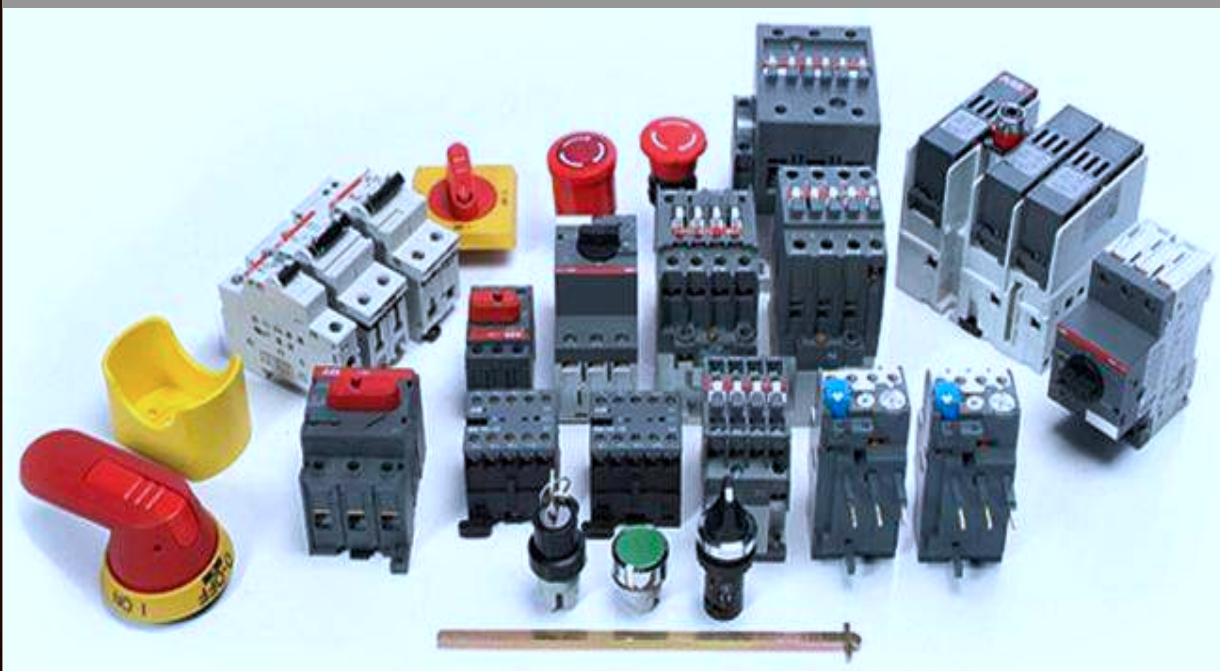


Н.Ю. Сипайлова

# Электрические и электронные аппараты



УДК 621.31+621.38(075.8)

ББК 31.264+32.85я73

Э455

Э455

**Электрические и электронные аппараты:** учебное пособие / сост. Н.Ю. Сипайлова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 236 с.

Учебное пособие состоит из пяти разделов, предусмотренных программой курса. В пособии рассмотрены основы теории электрических аппаратов, а также описаны основные типы электрических и электронных аппаратов. Теоретические положения функционирования электрических аппаратов иллюстрируются примерами решения задач и сопровождаются справочными материалами.

Пособие подготовлено на кафедре «Электромеханические комплексы и материалы» и предназначено для студентов ИнЭО, обучающихся по направлению 140400 «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 621.31+621.38(075.8)

ББК 31.264+32.85я73

### *Рецензенты*

Кандидат технических наук, доцент ТГАСУ

*В.М. Педиков*

Кандидат технических наук, доцент ТПУ

*Е.П. Богданов*

© Составление. ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2014

© Сипайлова Н.Ю., составление, 2014

© Обложка. Издательство Томского  
политехнического университета, 2014

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ.....</b>	<b>6</b>
1.1. Понятие <i>электрический аппарат</i> .....	6
1.2. Технические параметры электрических аппаратов.....	7
1.3. Защитные оболочки электрических аппаратов .....	8
1.4. Климатическое исполнение и категория размещения.....	8
1.5. Требования, предъявляемые к электрическим аппаратам .....	9
1.6. Обозначения электрических аппаратов .....	10
<b>2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ .....</b>	<b>11</b>
2.1. Контакты электрических аппаратов.....	11
2.1.1. Понятие <i>контакт</i> .....	11
2.1.2. Конструкции контактов .....	11
2.1.3. Сопротивление контакта.....	12
2.1.4. Нагрев контакта .....	15
2.1.5. Режимы работы контактов.....	18
2.1.6. Материалы контактов.....	19
2.1.7. Примеры решения задач .....	20
2.2. Электрическая дуга и дугогашение.....	23
2.2.1. Понятие <i>электрическая дуга</i> .....	23
2.2.2. Физические процессы в электрической дуге .....	24
2.2.3. Вольт-амперные характеристики дуги .....	26
2.2.4. Условия гашения дуги.....	28
2.2.5. Способы гашения дуги. Дугогасительные устройства.....	33
2.2.6. Примеры решения задач .....	35
2.3. Нагрев и охлаждение электрических аппаратов .....	38
2.3.1. Ограничения температуры элементов аппаратов.....	38
2.3.2. Задачи теплового расчета.....	39
2.3.3. Источники тепла в электрических аппаратах. Расчет мощности потерь..	39
2.3.4. Способы теплообмена .....	41
2.3.5. Режимы работы и нагрева электрических аппаратов.....	44
2.3.6. Процесс нагрева при коротком замыкании. Термическая стойкость электрического аппарата.....	47
2.3.7. Примеры решения задач .....	48
2.4. Электродинамические силы.....	55
2.4.1. Понятие <i>электродинамические силы</i> .....	55
2.4.2. Методы расчета электродинамических сил .....	55
2.4.3. ЭДУ между параллельными проводниками.....	57
2.4.4. ЭДУ витка, катушки, между витками и катушками.....	58
2.4.5. ЭДУ на переменном токе .....	60
2.4.6. Электродинамическая стойкость .....	62
2.4.7. Примеры решения задач .....	62
2.5. Магнитные цепи электрических аппаратов .....	67
2.5.1. Понятие <i>магнитная цепь</i> .....	67
2.5.2. Методы расчета магнитных цепей.....	67
2.5.3. Материалы магнитных цепей .....	70
2.5.4. Примеры решения задач .....	71
2.6. Электромагниты электрических аппаратов.....	73

2.6.1. Понятие <i>электромагнит</i> .....	73
2.6.2. Устройство и принцип действия электромагнита .....	74
2.6.3. Электромагнитная сила .....	75
2.6.4. Динамика электромагнита .....	79
2.6.5. Ускорение и замедление срабатывания электромагнита.....	83
2.6.6. Примеры решения задач .....	86
<b>3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ .....</b>	<b>90</b>
<b>3.1. Контактторы и пускатели .....</b>	<b>90</b>
3.1.1. Понятие <i>контактор</i> . Классификация контакторов .....	90
3.1.2. Общие сведения о контакторах .....	91
3.1.3. Устройство и принцип действия контактора .....	93
3.1.4. Магнитные пускатели .....	96
<b>3.2. Реле.....</b>	<b>98</b>
3.2.1. Общие сведения о реле.....	98
3.2.2. Типы реле .....	102
<b>3.3. Датчики .....</b>	<b>112</b>
3.3.1. Понятие <i>датчик</i> . Классификация датчиков .....	112
3.3.2. Параметры и характеристики датчиков.....	112
3.3.3. Требования, предъявляемые к датчикам .....	114
3.3.4. Резисторные датчики.....	114
3.3.5. Емкостные датчики.....	121
3.3.6. Индуктивные датчики .....	123
3.3.7. Трансформаторные датчики .....	125
3.3.8. Генераторные датчики .....	128
<b>3.4. Автоматические выключатели .....</b>	<b>132</b>
3.4.1. Общие сведения об автоматических выключателях .....	132
3.4.2. Конструкции и типы автоматических выключателей.....	133
3.4.3. Выбор автоматических выключателей .....	135
<b>3.5. Предохранители.....</b>	<b>136</b>
3.5.1. Понятие <i>предохранитель</i> .....	136
3.5.2. Основная характеристика и параметры предохранителя .....	136
3.5.3. Требования, предъявляемые к предохранителям .....	137
3.5.4. Материалы предохранителей .....	138
3.5.5. Типы и конструкции предохранителей .....	138
3.5.6. Выбор предохранителей.....	139
<b>4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ .....</b>	<b>141</b>
<b>4.1. Выключатели высокого напряжения .....</b>	<b>141</b>
4.1.1. Общие сведения о выключателях высокого напряжения.....	141
4.1.2. Типы выключателей высокого напряжения.....	141
4.1.3. Выбор выключателей высокого напряжения.....	143
<b>4.2. Разъединители, отделители и короткозамыкатели .....</b>	<b>144</b>
4.2.1. Общие сведения о разъединителях .....	144
4.2.2. Конструкции разъединителей.....	145
4.2.3. Выбор разъединителей.....	146
4.2.4. Общие сведения об отделителях и короткозамыкателях.....	146
4.2.5. Выбор отделителей и короткозамыкателей .....	147

<b>4.3. Реакторы .....</b>	<b>148</b>
4.3.1. Общие сведения о реакторах .....	148
4.3.2. Конструкции реакторов.....	151
<b>4.4. Измерительные трансформаторы.....</b>	<b>153</b>
4.4.1. Общие сведения об измерительных трансформаторах .....	153
4.4.2. Конструкции и схемы включения измерительных трансформаторов.....	154
<b>5. ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ.....</b>	<b>158</b>
<b>5.1. Общие сведения об электронных аппаратах .....</b>	<b>158</b>
5.1.1. Понятие <i>электронный аппарат</i> .....	158
5.1.2. Преимущества и недостатки электронных аппаратов .....	159
5.1.3. Классификация электронных аппаратов .....	161
5.1.4. Требования, предъявляемые к электронным аппаратам.....	163
<b>5.2. Гибридные электрические аппараты.....</b>	<b>163</b>
5.2.1. Понятие <i>гибридный аппарат</i> .....	163
5.2.2. Принцип действия и схемы гибридных аппаратов .....	165
<b>5.3. Электронные аппараты низкого напряжения.....</b>	<b>172</b>
5.3.1. Электронные аппараты постоянного тока на тиристорах .....	172
5.3.2. Электронные аппараты переменного тока на тиристорах.....	180
5.3.3. Электронные аппараты на транзисторах.....	184
5.3.4. Твердотельные реле.....	186
<b>5.4. Электронные аппараты высокого напряжения.....</b>	<b>197</b>
5.4.1. Общие сведения об электронных аппаратах высокого напряжения .....	197
5.4.2. Гибридные электронные аппараты высокого напряжения.....	199
<b>5.5. Системы управления электронными аппаратами .....</b>	<b>202</b>
5.5.1. Требования к системам управления.....	202
5.5.2. Импульсное управление.....	204
5.5.3. Транзисторные и трансформаторные схемы управления в аппаратах низкого напряжения .....	210
5.5.4. Системы управления электронных аппаратов высокого напряжения ....	214
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ.....</b>	<b>223</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>235</b>

# 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

## ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТАХ

### 1.1. Понятие *электрический аппарат*

**Электрический аппарат** – это электротехническое устройство (прибор), предназначенное для управления электрическим током. Электрические аппараты применяются при использовании электрической энергии, начиная от ее производства, передачи, распределения и заканчивая потреблением.

**Функциями** электрических аппаратов являются: коммутация (включение и отключение) электрических цепей; защита электрического оборудования от аварийных режимов; контроль, регулирование и измерение параметров электрического тока.

**Область применения** электрических аппаратов – быт, транспорт, промышленность, энергетика (электрические станции и сети).

Разнообразие видов электрических аппаратов, различие традиций мировых электротехнических школ и многозначность термина «аппарат» (лат. *apparatus*) затрудняет их классификацию.

Существует **условная классификация** электрических аппаратов [11].

**В соответствии с назначением** электрические аппараты подразделяются на следующие группы:

- **Коммутационные аппараты распределительных устройств** (рубильники, пакетные выключатели, выключатели нагрузки, короткозамыкатели, выключатели высокого напряжения, разъединители, отделители, автоматические выключатели, предохранители) служат для включения и отключения электрических цепей. Для этих аппаратов характерно относительно редкое срабатывание (включение или отключение цепей).

- **Ограничивающие аппараты** предназначены для ограничения токов короткого замыкания (реакторы) и перенапряжений (разрядники). Эти аппараты редко подвергаются нагрузкам, так как режимы короткого замыкания и перенапряжений являются аварийными.

- **Пускорегулирующие аппараты** (контроллеры, командоконтроллеры, контакторы, пускатели, резисторы, реостаты) служат для пуска, регулирования частоты вращения, напряжения и тока электрических машин и других потребителей электрической энергии. Для них характерны частые срабатывания.

- **Аппараты для контроля заданных электрических или неэлектрических параметров** (группу представляют реле и датчики).

▪ **Аппараты для измерений** (трансформаторы тока и напряжения, емкостные делители напряжения) позволяют изолировать измерительные и защитные приборы от цепи главного тока.

▪ **Электрические регуляторы** (стабилизаторы, регуляторы напряжения, тока, мощности) предназначены для регулирования заданного параметра по определенному закону (например, для поддержания на неизменном уровне напряжения, тока, температуры, частоты вращения и других величин).

**В соответствии с областями применения** электрические аппараты электрических систем и электроснабжения объединяют в группу **аппаратов распределительных устройств** низкого и высокого напряжения, а аппараты, предназначенные для автоматического управления электроприводами и для автоматизации технологических процессов, – в группу **аппаратов управления**.

Аппараты подразделяются на **контактные** и **бесконтактные (статические)**. Первые имеют контактную систему с различными типами приводов, с помощью которой осуществляется физический разрыв электрической цепи. Коммутирующий элемент бесконтактных аппаратов представляет собой электрическое сопротивление, величина которого меняется от минимального (аппарат включен) до максимального (аппарат выключен) значения. Первыми статическими электрическими аппаратами были магнитные усилители. Новый класс бесконтактных электрических аппаратов – силовых электронных аппаратов – создан в результате достижений современной силовой электроники.

**В зависимости от величины номинального напряжения** электрические аппараты разделяются на аппараты **низкого** (до 1000 В) (аппараты управления и защиты, аппараты автоматического регулирования, аппараты автоматики) и **высокого** (свыше 1000 В) напряжения (выключатели высокого напряжения, токоограничивающие и шунтирующие реакторы, ограничители перенапряжений, разъединители и отделители, измерительные трансформаторы для высоковольтных цепей).

Аппараты иногда классифицируются по **величине коммутируемого тока**: **слаботочные** (до 10 А) и **сильноточные** (свыше 10 А). При этом нижние пределы коммутируемых современными аппаратами токов достигают  $10^{-9}$  А, а напряжений –  $10^{-5}$  В.

## 1.2. Технические параметры электрических аппаратов

К основным **техническим параметрам** электрических аппаратов относятся: **номинальное напряжение** (напряжение, на которое рассчитан электрический аппарат с точки зрения выполнения им функций

и изоляции его токоведущих частей), **номинальный ток** (ток, длительное протекание которого не вызывает нагрева токоведущих частей выше допустимых значений, определяемых классом изоляции), **номинальный рабочий ток** (ток в цепи, где эксплуатируется аппарат), **категория применения** (определяет область применения электрического аппарата в зависимости от характера нагрузки и условий эксплуатации), **режим работы**.

### 1.3. Защитные оболочки электрических аппаратов

**Защитные оболочки аппаратов** применяют для предотвращения соприкосновения обслуживающего персонала с токоведущими и подвижными частями и исключения попадания в аппараты инородных тел. Аппараты могут быть **открытого, защищенного, закрытого** исполнения. Защитные свойства оболочек аппаратов оговариваются стандартами.

**Степень защиты** обозначается буквами IP и двумя цифрами. Первая цифра характеризует степень защиты аппарата от проникновения внутрь инородных тел и от соприкосновения обслуживающего персонала с деталями аппарата, вторая цифра характеризует защиту аппарата от проникновения воды. Например, магнитный пускатель, имеющий степень защиты IP54, не защищен полностью от проникновения внутрь оболочки пыли, однако пыль не влияет на нормальную работу самого аппарата. Кроме того, вода, разбрызгиваемая на оболочку в любом направлении, не должна оказывать вредного воздействия на аппарат.

### 1.4. Климатическое исполнение и категория размещения

В условиях эксплуатации на электрические аппараты воздействуют климатические факторы (температура, влажность, давление воздуха, солнечное излучение, дождь, ветер, солевой туман, иней и т.д.). В технической документации на электрический аппарат всегда оговариваются значения климатических факторов, в пределах которых обеспечивается его нормальная эксплуатация. Определены 10 типов **климатического исполнения** изделия, которые подразделяются на 2 группы: изделия, предназначенные для эксплуатации на суше, озерах, реках, и изделия, предназначенные для эксплуатации в районах с морским климатом. В табл. 1 приведены условные обозначения климатических исполнений электрических аппаратов, предназначенных для эксплуатации на суше, озерах, реках.



Таблица 1

## Климатические исполнения электрических аппаратов

Исполнение электрического аппарата	Обозначение		
	рус.	лат.	цифр.
Для микроклиматических районов с умеренным климатом	У	(N)	0
с умеренным и холодным климатом	УХЛ	(NF)	1
с влажным тропическим климатом	ТВ	(TH)	2
с сухим тропическим климатом	ТС	(TA)	3
с сухим и влажным тропическим климатом	Т	(T)	4
Для всех макроклиматических районов (общеклиматическое)	О	(U)	5

Кроме того, выделены пять **категорий размещения** изделий в зависимости от условий, в которых они должны работать: рабочее и предельное значение температуры воздуха, относительная влажность воздуха, нормы наличия пыли и т.д. Условные обозначения категорий размещения электрических аппаратов приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Категории размещения электрических аппаратов

Категория размещения электрического аппарата	Обозначение
На открытом воздухе	1
Под навесом или в помещениях со свободным доступом воздуха	2
В закрытых помещениях с естественной вентиляцией	3
В помещениях с искусственно регулируемые условиями	4
В помещениях с повышенной влажностью	5

Климатическое исполнение и категория размещения аппаратов указываются в их обозначениях. Например, контактор постоянного тока КП-207-УЗ может быть использован в средах с умеренным климатом (У), в закрытых помещениях с естественной вентиляцией (З).

### 1.5. Требования, предъявляемые к электрическим аппаратам

**Требования, предъявляемые к электрическим аппаратам**, зависят от назначения и условий эксплуатации аппаратов и определяются стандартами или техническими условиями. Эти требования направлены на обеспечение надежной работы и большого срока службы аппарата;

малых материальных затрат при изготовлении, монтаже и эксплуатации, а также на снижение звуковых, световых, тепловых эффектов при работе аппаратов.

**Основные требования** сводятся к требованиям *термической и динамической стойкости, высокой механической и электрической износостойкости* (для аппаратов, предназначенных для частых срабатываний), *минимально возможной массе, габаритным размерам, стоимости, времени установки и обслуживания* аппаратов, а также их *технологичности* (обеспечение простоты и удобства изготовления, сборки и регулировки деталей, преемственности в производстве).

В частности, нормативными документами регламентируются требования по вибро- и ударостойкости аппаратов. Всего имеется 29 групп механических воздействий. Например, в группе эксплуатации М1 (непосредственно на стенах предприятий, фундаменте и т.п.) аппарат должен выдерживать нагрузки частотой до 35 Гц и ускорением  $0,5 \text{ м/с}^2$ .

Для проверки соответствия выпускаемых заводами электрических аппаратов требованиям стандартов и технических условий проводятся контрольные (для каждого аппарата или части аппаратов из большой партии) и типовые (при выпуске нового типа аппарата и периодически в течение всего времени его производства) испытания.

При контрольных испытаниях производится внешний осмотр аппарата, испытание электрической изоляции, проверка некоторых характерных параметров. При типовых испытаниях производится всесторонняя проверка всех характеристик аппарата, обеспечивающих его нормальную работу в условиях эксплуатации.

## **1.6. Обозначения электрических аппаратов**

Для удобства чтения схем вводятся **условные графические обозначения** аппаратов и их элементов.

Существуют также **сокращенные условные обозначения** аппаратов, например, ВЭ-10-1250-20-У3 (выключатель электромагнитный, напряжение 10 кВ, номинальный ток 1250 А, номинальный ток отключения 20 кА, предназначен для эксплуатации в зоне умеренного климата в закрытых помещениях).

## 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

### 2.1. Контакты электрических аппаратов

#### 2.1.1. Понятие *контакт*

Электрические контакты предназначены для соединения элементов электрической цепи.

**Электрический контакт** можно рассматривать как место перехода тока из одного токоведущего элемента в другой. Соприкасающиеся (контактирующие) проводники называют контактами, или контакт-детальями.

В замкнутом положении контакты электрических аппаратов сжаты с определенной силой, создаваемой контактными пружинами.

По **назначению** контакты делятся на **соединительные** (**неразъемные**), которые служат только для проведения тока и всегда замкнуты, и **коммутирующие**, которые дополнительно служат для включения, отключения и переключения электрических цепей.

**Коммутирующие контакты** в силовых аппаратах можно разделить на **главные (токоведущие)** и **дугогасительные**. Главные шунтируются дугогасительными, поэтому образование дуги происходит на дугогасительных контактах и главные оказываются защищенными от воздействия дуги. Часто одни и те же контакты выполняют роль и главных, и дугогасительных.

**Слаботочные контакты** используются в реле защиты и автоматики и коммутируют токи до 5 А при напряжении в десятки и сотни вольт. **Контакты аппаратов управления** коммутируют токи в нормальном режиме до 1 кВ. **Силовые контакты** используются для коммутации токов в десятки тысяч ампер при напряжении до сотен тысяч вольт.

#### 2.1.2. Конструкции контактов

По конструктивному исполнению соединительные контакты могут быть **неподвижными и подвижными**.

**Неподвижные контакты** могут быть **неразъемными** (например, сварными, рис. 1) и **разъемными** (например, болтовыми, рис. 2).

Различают следующие типы **подвижных контактов**: **скользящие щеточные, роликовые, жидкометаллические**.

*Коммутирующие контакты* могут быть *рычажными* (рис. 3), *рубящими*, *торцовыми*, *щеточными*, *пальцевыми* (рис. 4), *розеточными*, *с плоскими пружинами* для реле (рис. 5) и т.д.

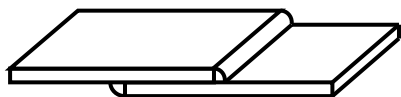


Рис. 1. Сварной контакт

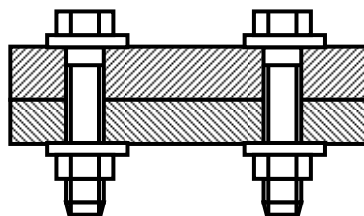


Рис. 2. Болтовой контакт

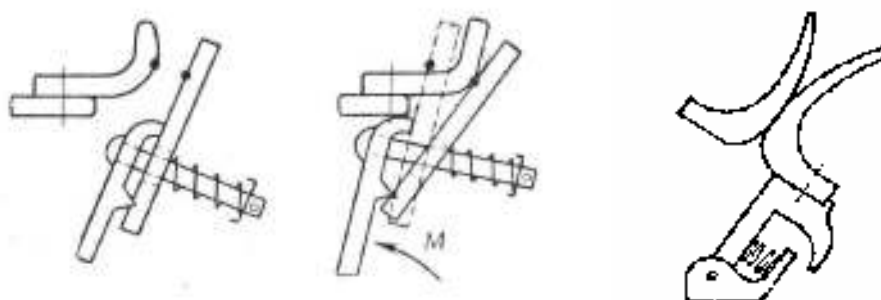


Рис. 3. Рычажные контакты

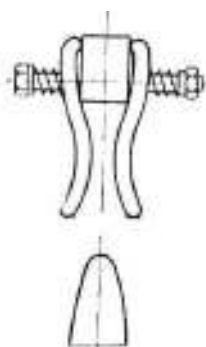


Рис. 4. Пальцевые контакты

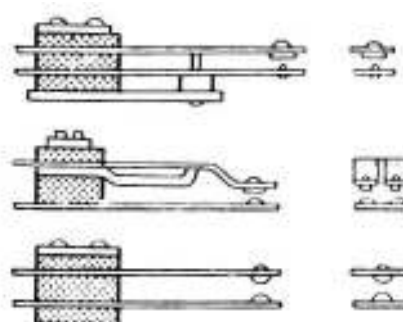
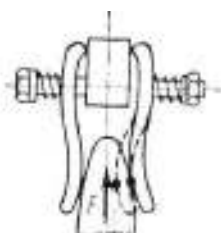


Рис. 5. Контакты с плоскими пружинами

### 2.1.3. Сопротивление контакта

Сопротивление контакта (переходное сопротивление)  $R_k$  складывается из *сопротивления стягивания*  $R_c$  и *сопротивления пленок*  $R_{пл}$ :

$$R_k = R_c + R_{пл}. \quad (1)$$

*Сопротивление стягивания* обусловлено стягиванием линий тока к местам истинного касания контактирующих проводников (рис. 6) и зависит от материала и обработки контактирующих проводников, числа площадок касания, силы сжатия.

**Сопротивление пленок** обусловлено загрязнением или окислением поверхностей контактирующих проводников и может меняться в процессе эксплуатации. Возникновение пленок на поверхности контактов зависит от материала контактов, температуры среды, в которой находятся контакты.

Борьба с пленками ведется конструктивными мерами. Конструкции контактов выполняют таким образом, чтобы при размыкании или замыкании они разрушали пленку. В соединительных контактах защита от образования оксидных пленок осуществляется с помощью специальных смазок.

Пленки особенно опасны при малых токах, так как в этом случае сопротивления  $R_c$  и  $R_{пл}$  соизмеримы. В связи с этим контакты на малые токи изготавливаются из благородных материалов (золото, платина и др.), менее подверженных образованию пленок.

Положительная роль оксидных пленок заключается в том, что они не дают возможности развиваться чрезмерно большим силам межмолекулярного сцепления на поверхности касания контактов.

Для **расчета сопротивления стягивания** разработаны различные упрощающие **модели контактирования**. В одной из простейших **моделей Хольма** площадка касания представляет собой круг радиуса  $a$ .

Сопротивление стягивания при этом определяется выражением

$$R_c = \rho / (2na), \quad (2)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала контактов;  $n$  – число одинаковых площадок касания.

Радиус площадки касания в случае упругой деформации:

▪ при сжатии контактов силой  $F$  гладких поверхностей *шар – плоскость* из одинаковых материалов определяется формулой Герца

$$a_{шп} = 1,11\sqrt[3]{Fr / (En)}, \quad (3)$$

где  $r$  – радиус шара;  $E$  – модуль упругости;

▪ при сжатии двух одинаковых шаровых поверхностей – выражением

$$a_{шш} = 0,86\sqrt[3]{Fr / (En)}. \quad (4)$$

Если деформация при сжатии контактов носит пластический характер, то радиус площадки касания определяется как

$$a = \sqrt{F / (\pi\sigma_{см})}, \quad (5)$$

где  $\sigma_{см}$  – временное сопротивление смятия материала контактов.

Для практических расчетов сопротивления контакта часто используют эмпирическую формулу

$$R_k = K_0 / F^m. \quad (6)$$

Значения коэффициента  $K_0$  приводятся в справочных таблицах (табл. 3). Показатель степени  $m$  принимается равным: для точечного контакта ( $n = 1$ ) – 0,5; для линейного ( $n = 2$ ) – 0,5-0,8; для плоскостного ( $n \geq 3$ ) – 1.

Таблица 3

Коэффициент  $K_0$  для расчета сопротивления контакта

Материал контактов	Тип контакта	Условия	Значения $K_0$ , мкОм · Н <sup><i>m</i></sup>
Медь – медь		Сильноточные	400
Латунь – сталь		Сильноточные	$3 \cdot 10^3$
Медь – медь	Плоскостной	Слаботочные	$(90 - 280) \cdot 10^3$
Медь – медь	Точечный	Слаботочные	$(140 - 170) \cdot 10^3$
Медь – медь	Щеточный	Слаботочные	$100 \cdot 10^3$

С ростом силы сжатия  $F$  сопротивление контакта уменьшается (кривая 1, рис. 7). При уменьшении силы сжатия (кривая 2) зависимость  $R_c(F)$  идет ниже из-за наличия остаточных деформаций контактирующих выступов.

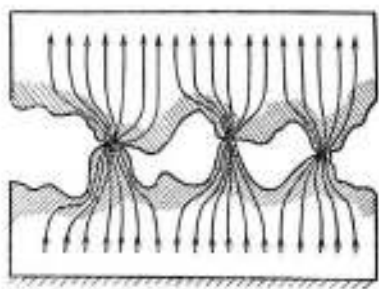


Рис. 6. Стягивание линий тока в контакте

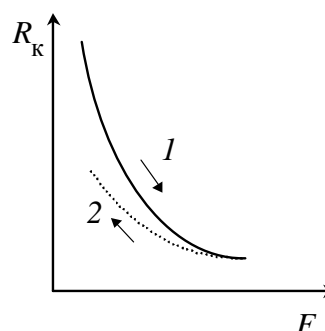


Рис. 7. Характеристика переходного сопротивления

Сопротивление контакта не остается постоянным в эксплуатации из-за действия электрического поля и температуры. Обычно экспериментальные исследования и расчет переходного сопротивления ведутся для свежезачищенных контактов.

### 2.1.4. Нагрев контакта

В контактном соединении можно выделить зону стягивания, протяженность которой невелика и в которой сосредоточено переходное сопротивление. Теплота, генерируемая в этой зоне, распространяется от площадки касания в части проводников, прилегающие к ней, только за счет теплопроводности, а затем – в окружающую среду. На рис. 8 изображена картина распространения теплоты в симметричном контактном соединении.

**Кривая распределения превышения температуры вдоль проводника с контактом** изображена на рис. 9. Наибольшую температуру имеет площадка касания. По мере удаления от нее температура быстро падает.

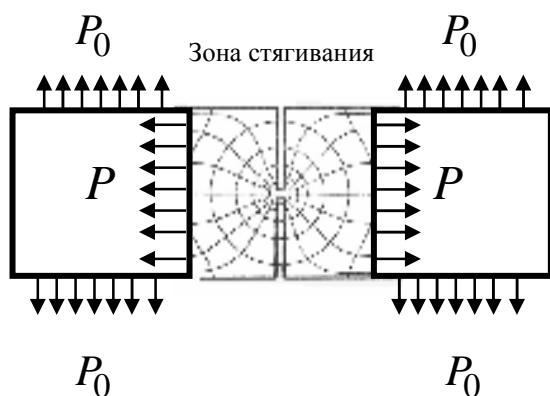


Рис. 8. Распространение теплоты в контактном соединении

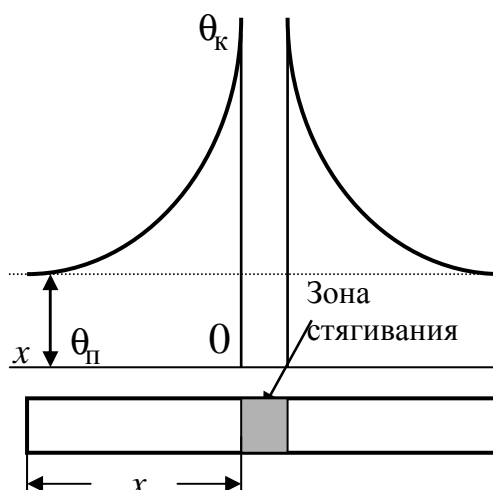


Рис. 9. Распределение температуры в контакте

**Уравнение распределения превышения температуры вдоль проводника** выглядит следующим образом:

$$\tau(x) = \tau_{\Pi} + \frac{1}{2} I^2 R_k \frac{1}{p \lambda q} e^{-px}, \quad (7)$$

где  $\tau_{\Pi}$  – превышение температуры проводника над температурой окружающей среды при  $x \rightarrow \infty$ ;  $p = \sqrt{k_{\text{то}} \Pi_0 / (\lambda \cdot q)}$ ;  $k_{\text{то}}$  – коэффициент теплоотдачи с боковой поверхности проводника;  $\Pi_0$  – периметр боковой поверхности проводника;  $\lambda$  – теплопроводность проводника;  $q$  – площадь поперечного сечения проводника.

**Превышение температуры тела контакта** (превышение температуры границы области стягивания  $x = 0$ )

$$\tau_k = \tau_{\Pi} + \frac{1}{2} I^2 R_k \frac{1}{p \lambda q}. \quad (8)$$

Если расстояние между двумя соседними контактами удовлетворяет условию  $l > 5\sqrt{\lambda q / (k_{\text{то}} \Pi_0)}$ , то взаимным тепловым влиянием контактов можно пренебречь.

На основании теоремы Кольрауша и Диссельхорста для идеализированной модели контактирования (в симметричной области стягивания все эквипотенциальные поверхности являются изотермическими) выводится уравнение, связывающее падение напряжения на контакте  $U_k$  с температурой площадки касания  $\theta_a$ :

$$U_k^2 / 4 = L(\theta_a^2 - \theta_k^2), \quad (9)$$

где  $\theta_k$  – температура на границе зоны стягивания ( $x=0$ );  $L$  – постоянная, для большинства металлов близкая к  $L = 24 \cdot 10^{-8} \text{ В}^2 \text{ К}^{-2}$ .

**Температура площадки касания** связана с температурой тела контакта:

$$\theta_a = \theta_k \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \left( \frac{I}{4a} \sqrt{\frac{\lambda \rho_0}{\alpha}} \right)}, \quad (10)$$

где  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления.

Из уравнения (9) следует, что для данного материала существуют определенные падения напряжения на контакте, при которых температура площадки касания достигает значений, определяющих фазовое состояние материала (размягчения, плавления, кипения, табл. 4).

Таблица 4

Напряжения размягчения и плавления

Материал	Напряжение размягчения, В	Напряжение плавления, В
Серебро	0,09	0,37
Медь	0,12	0,43
Никель	0,22	0,65
Платина	0,25	0,65
Вольфрам	0,4	1,1

Для слаботочных контактов принимают, что допустимое падение напряжения не должно превосходить напряжения размягчения  $U_{\text{к.доп}} \leq (0,5 - 0,8) U_p$ .

Если известен ток  $I$ , который должны пропускать контакты, то можно найти допустимое сопротивление контакта



$$R_{\text{к,доп}} = U_{\text{к,доп}} / I. \quad (11)$$

При выбранном материале контактов знание сопротивления контактов позволяет отыскивать необходимую силу сжатия контактов.

Расчет одноточечных контактов на большие токи ведется по выражению

$$F = I_{\text{н}}^2 \frac{B\pi HV}{16\lambda^2 \left( \arccos \frac{\theta_{\text{к}}}{\theta_a} \right)^2}, \quad (12)$$

где  $I_{\text{н}}$  – номинальный ток;  $F$  – сила контактного нажатия;  $HV$  – твердость по Виккерсу;  $B$  – число Лоренца.

Токи короткого замыкания и длительные токи перегрузки могут привести к расплавлению материала контактов и их свариванию.

**Минимальный плавящийся ток** определяется выражением

$$I_{\text{пл}\infty} = a_{\text{пл}} \sqrt{\frac{32\lambda_{\text{пл}}\theta_{\text{к}}}{\rho_{\text{пл}}}}. \quad (13)$$

В этом выражении все величины должны быть взяты при температуре плавления. Размеры площадки касания при температуре плавления  $a_{\text{пл}} = 1,5a$ .

Минимальный плавящийся ток, с учетом изменения температуры во времени,

$$I_{\text{пл}}(t) = I_{\text{пл}\infty} F(\xi), \quad (14)$$

где функция  $F(\xi)$  выбирается в зависимости от  $\xi = \frac{a}{2} \sqrt{\frac{c\gamma}{\lambda t}}$  (рис. 10),

$c$  – удельная теплоемкость материала;  $\gamma$  – плотность материала.

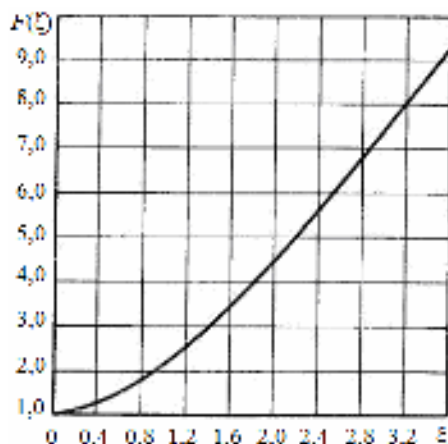


Рис. 10. График функции  $F(\xi)$

При практических расчетах используют *эмпирическую зависимость* между минимальным током сваривания  $I_{\text{св.мин}}$  и силой сжатия контактов

$$I \leq I_{\text{св.мин}} = k\sqrt{F}. \quad (15)$$

Коэффициент  $k$  зависит от свойств материала и конструкции контактов (табл. 5).

Таблица 5

Коэффициент  $k$  для расчета тока сваривания

Тип контакта	Материал	$k, \text{А/кГ}^{0,5}$
Щеточный	Медь – латунь	3000–4000
Пальцевый несамостоятельно устанавливающийся	Медь – медь. Латунь – латунь	4100; 5050
Пальцевый самостоятельно устанавливающийся	Медь – латунь	5750
Розеточный (на 1 элемент розетки)	Медь – латунь. Медь – медь	5500; 6000

Для медных и латунных контактов по опытным данным величина  $k = 1000 - 2000 \text{ А/Н}^{1/2}$ .

### 2.1.5. Режимы работы контактов

Условия работы контактов определяются их возможными состояниями (контакты замкнуты или разомкнуты).

**Замкнутое состояние** характеризуется протеканием номинальных и аварийных токов, а также процессами нагрева контактов.

**Разомкнутое состояние** характеризуется максимальным напряжением, которое выдерживает изоляционный межконтактный промежуток без пробоя. Напряжение пробоя межконтактного промежутка в целях надежности должно быть выше максимального напряжения при разомкнутых контактах. Расстояние между ближайшими точками контактных деталей в разомкнутом состоянии называется раствором контактов. Раствор контактов выбирается из условий электрической прочности межконтактного промежутка и гашения дуги. Установлены соответствующие испытательные напряжения, воздействие которых должны выдерживать межконтактные промежутки.

Работоспособность коммутирующих контактов характеризуется также процессами замыкания (включения) и размыкания (отключения) цепи.

**Включение цепи.** При включении электрических аппаратов в их контактах могут иметь место следующие процессы: вибрации, эрозия на поверхности контактов в результате образования электрического разряда между ними. При достижении некоторого расстояния между контактами создаются условия для электрического пробоя, в результате которого между электродами загорается дуга замыкания. При соприкосновении контактов дуга гаснет. Если соприкосновение контактов носит ударный характер, то возможен неоднократный отброс подвижного контакта (вибрация). Не исключено повторное возникновение дуги или искры, которые ведут к износу контактов.

**Отключение цепи.** В процессе размыкания сила сжатия контактов уменьшается, переходное сопротивление увеличивается, за счет чего растет температура площадок касания. В момент разъединения контакты нагреваются до температуры плавления и между ними возникает мостик из жидкого металла. При дальнейшем движении контактов мостик обрывается и, в зависимости от параметров отключаемой цепи, возникает дуговой или тлеющий разряд. Разрыв жидкометаллического мостика, проскакивание искры или горение дуги являются причинами износа контактов (электрической эрозии). Высокая температура приводит к интенсивному окислению и распылению материала контактов в окружающем пространстве, переносу материала с одного электрода на другой и образованию пленок. Перенос материала с одного контакта на другой наиболее вреден при постоянном токе, так как направление переноса в этом случае постоянно. Эрозия контактов под действием малых токов определяется мостиковой стадией и стадией искрового разряда. Для уменьшения эрозии применяются искрогасительные схемы. Для борьбы с эрозией контактов сокращают длительность горения дуги с помощью дугогасительных устройств, устраняют вибрации контактов при включении, применяют дугостойкие материалы контактов.

### **2.1.6. Материалы контактов**

**Материалы контактов** должны иметь высокие электрическую проводимость и теплопроводность, стойкость против образования пленок и коррозии, малую твердость для уменьшения силы сжатия, высокую твердость для уменьшения механического износа, малую эрозию, высокую дугостойкость, простоту обработки, низкую стоимость.

В качестве материалов контактов используют: чистые металлы (медь, алюминий, серебро, вольфрам и др.), сплавы (латунь, бронза и др.), неметаллы (углерод), композиции взаимно не сплавляемых металлов (вольфрам-серебро, вольфрам-медь), композиции металлов с оксидами

металлов (серебро – оксид кадмия, серебро – оксид меди, медь – оксид меди), композиции металлов с карбидами (вольфрам – карбид вольфрама), композиции металлов с углеродом (серебро – графит, медь – графит) и многочисленные тройные композиции. Выбор материала контактов определяется условиями их работы.

### 2.1.7. Примеры решения задач

**Пример 1.** Два круглых медных стержня на торцах обработаны под сферу  $r = 40$  мм и стянуты силой  $F = 100$  Н. Определить сопротивление стягивания  $R_c$ .

*Решение.* Найдём радиус площади касания при условии, что имеет место упругая деформация [выражение (4)]

$$a = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{F \cdot r}{E}} = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{100 \cdot 40 \cdot 10^{-3}}{10,8 \cdot 10^{10}}} = 2,87 \cdot 10^{-4} \text{ м},$$

где  $E = 10,8 \cdot 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup> – модуль упругости меди (табл. П.1).

Механическое напряжение в контактной площадке

$$\sigma = \frac{F}{\pi \cdot a^2} = \frac{100}{3,14 \cdot (2,87 \cdot 10^{-4})^2} = 38,7 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^2.$$

Это напряжение больше, чем напряжение смятия меди  $\sigma_{см} = 38,3 \cdot 10^7$  Н/м<sup>2</sup>, и, следовательно, будет иметь место пластическая деформация.

Радиус площадки касания при пластической деформации определим по формуле (5)

$$a = \sqrt{F / (\pi \cdot \sigma_{см})} = \sqrt{100 / (3,14 \cdot 38,3 \cdot 10^7)} = 2,88 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Сопротивление стягивания будет равно

$$R_c = \frac{\rho}{2a} = \frac{1,62 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 2,88 \cdot 10^{-4}} = 0,28 \cdot 10^{-4} \text{ Ом},$$

где  $\rho = 1,62 \cdot 10^{-8}$  Ом·м – удельное сопротивление меди (табл. П.1).

*Ответ:*  $R_c = 0,28 \cdot 10^{-4}$  Ом.

**Пример 2.** Определить величину  $F$  контактного нажатия мостикового контакта, если через контакт протекает ток  $I = 5$  А, а контакты изготовлены из серебряных накладок полусферической формы радиуса  $r = 1$  см.

*Решение.* Для надежной работы контактов необходимо, чтобы падение напряжения на них было меньше напряжения размягчения  $U_{\text{к.доп}} \leq (0,5 - 0,8) \cdot U_{\text{разм}}$ .

Примем, что  $U_{\text{к.доп}} = 0,5U_{\text{разм}}$  (по табл. 4 для серебра  $U_{\text{разм}} = 0,09 \text{ В}$ ).

Допустимое сопротивление контактов

$$R_{\text{к.доп}} = \frac{U_{\text{к.доп}}}{I} = \frac{0,5 \cdot 0,09}{5} = 9 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Определим радиус площадки касания по формуле (2)

$$a = \frac{\rho}{2R_{\text{к.доп}}} = \frac{1,5 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 9 \cdot 10^{-3}} = 0,083 \cdot 10^{-5} \text{ м,}$$

где  $\rho = 1,5 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  – удельное сопротивление серебра.

В случае упругой деформации при контактировании двух сферических поверхностей радиус площади касания [выражение (4)]

$$a = 0,86 \cdot \sqrt[3]{\frac{F \cdot r}{E}},$$

откуда сила нажатия на один контакт

$$F = \frac{a^3 \cdot E}{0,86^3 \cdot r} = \frac{(0,083 \cdot 10^{-5})^3 \cdot 7,4 \cdot 10^{10}}{0,86^3 \cdot 10^{-2}} = 6,65 \cdot 10^{-6} \text{ Н,}$$

где  $E = 7,4 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$  – модуль упругости серебра.

Так как мостик имеет два контакта, суммарная сила контактов

$$F_{\text{к}} = 2 \cdot F = 2 \cdot 6,65 \cdot 10^{-6} = 13,3 \cdot 10^{-6} \text{ Н.}$$

*Ответ:*  $F_{\text{к}} = 13,3 \cdot 10^{-6} \text{ Н.}$

**Пример 3.** Определить температуру контакта, выполненного в виде двух плоских медных шин размером  $60 \times 10 \text{ мм}$ , составленных встык и сжатых силой  $F = 300 \text{ Н}$ . Через контакт протекает ток  $I = 1600 \text{ А}$ , шины находятся в воздухе, температура которого  $\theta_0 = 35^\circ \text{С}$ , коэффициент теплоотдачи с поверхностями шин  $k_{\text{то}} = 16 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ \text{С)}$ . Шины бесконечно длинные.

*Решение.* Определим установившееся значение температуры шины в точках, удаленных от места контактирования, по закону Ньютона (разд. 2.3.4):

$$\theta - \theta_0 = I^2 \rho_0 (1 + \alpha \theta) / (q \cdot k_{\text{то}} \cdot \Pi_0),$$

где  $\theta - \theta_0$  – превышение температуры тела над температурой окружающей среды;  $\alpha = 0,0043 \text{ 1/}^\circ\text{C}$  – температурный коэффициент меди;  $q = 600 \text{ мм}^2$  – сечение проводника;  $\Pi_0 = 2 \cdot (60 + 10) = 140 \text{ мм}$  – периметр проводника.

Получим температуру проводника

$$\theta_{\text{пр}} = \frac{\theta_0 \cdot k_{\text{то}} \cdot q \cdot \Pi_0 + I^2 \cdot \rho_0}{k_{\text{то}} \cdot q \cdot \Pi_0 - I^2 \cdot \rho_0 \cdot \alpha} =$$

$$= \frac{35 \cdot 16 \cdot 600 \cdot 10^{-6} \cdot 140 \cdot 10^{-3} + 1600^2 \cdot 1,62 \cdot 10^{-8}}{16 \cdot 600 \cdot 10^{-6} \cdot 140 \cdot 10^{-3} - 1600^2 \cdot 1,62 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0043} = 75,9 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Температура контакта, в соответствии с уравнением (7),

$$\theta_{\text{к}} = \theta_{\text{пр}} + \frac{1}{2} I^2 \cdot R_{\text{к}} \cdot \frac{1}{p \lambda q} =$$

$$= 75,9 + \frac{1}{2} 1600^2 \cdot 1,33 \cdot 10^{-6} \frac{1}{3,094 \cdot 390 \cdot 600 \cdot 10^{-6}} = 78 \text{ }^\circ\text{C},$$

где  $p = \sqrt{k_{\text{то}} \cdot \Pi_0 / (\lambda \cdot q)} = \sqrt{16 \cdot 140 \cdot 10^{-3} / (390 \cdot 600 \cdot 10^{-6})} = 3,094 \text{ 1/м}^2$ ;

$R_{\text{к}} = K_0 / F = 400 \cdot 10^{-6} / 300 = 1,33 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$  – сопротивление плоскостного контакта, рассчитанное по эмпирической формуле (6);  $\lambda = 390 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$  – теплопроводность меди.

*Ответ:*  $\theta_{\text{к}} = 78 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Пример 4.** Определить минимальный сваривающий ток розеточного контакта из меди, если сила  $F = 50 \text{ Н}$  на одну ламель, всего ламелей 6 штук.

*Решение.* В практических расчетах можно воспользоваться формулой Буткевича, которая непосредственно связывает минимальный сваривающий ток и силу контактного нажатия.

Для одной ламели по выражению (15)

$$I_{\text{св.мин1}} = k \sqrt{F} = 6000 \sqrt{50 / 9,81} = 13545,7 \text{ А},$$

где  $k = 6000 \text{ А/кг}^{0,5}$  – коэффициент, выбираемый из справочника по типу контакта и материалу, из которого сделан контакт (табл. 5).

Для всего контакта

$$I_{\text{св.мин6}} = 6 \cdot 13545,7 = 81274 \text{ А}.$$

*Ответ:*  $I_{\text{св.мин6}} = 81274 \text{ А}$ .

**Пример 5.** Два медных стержня диаметром  $d = 20$  мм сжаты силой  $F = 390$  Н. Торцы обработаны под сферу  $r = 10$  мм. Определить, какой постоянный ток в течение времени  $t = 0,2$  с контакты выдержат без сваривания.

*Решение.* Минимальный плавящий ток можно определить по формуле (13):

$$I_{\text{пл}\infty} = a_{\text{пл}} \sqrt{\frac{32\lambda\theta_{\text{пл}}}{\rho_{\text{пл}}}} = 8,55 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{32 \cdot 390 \cdot 1083}{9,164 \cdot 10^{-8}}} = 10383,5 \text{ А},$$

где  $\theta_{\text{пл}} = 1083$  °С – температура плавления меди;  
 $\rho_{\text{пл}} = \rho_0(1 + \alpha\theta_{\text{пл}}) = 1,62 \cdot 10^{-8}(1 + 0,0043 \cdot 1083) = 9,164 \cdot 10^{-8}$  Ом·м – удельное сопротивление меди при температуре плавления;  
 $a = \sqrt{F / (\pi \cdot \sigma_{\text{см}})} = \sqrt{390 / (3,14 \cdot 38,3 \cdot 10^7)} = 5,7 \cdot 10^{-4}$  м – радиус площадки касания (при температуре плавления радиус площадки касания  $a_{\text{пл}} = 1,5a = 1,5 \cdot 5,7 \cdot 10^{-4} = 8,5 \cdot 10^{-4}$  м).

Изменение температуры во времени определяется безразмерным комплексом  $\xi$ :

$$\xi = \frac{a_{\text{пл}}}{2} \sqrt{\frac{c\gamma}{\lambda t}} = \frac{8,55 \cdot 10^{-4}}{2} \sqrt{\frac{390 \cdot 8700}{390 \cdot 0,2}} = 0,0892,$$

где  $c = 390$  Дж/(кг·°С) – удельная теплоемкость меди;  $\gamma = 8700$  кг/м<sup>3</sup> – плотность меди.

Ток, плавящий площадку за время  $t$  по формуле (14),

$$I_{\text{пл}} = I_{\text{пл}\infty} \cdot F(\xi) = 10383,5 \cdot 1,1 = 11421,9 \text{ А},$$

где  $F(\xi) = 1,1$  – функция, определяемая по графику (рис. 10).

*Ответ:*  $I_{\text{пл}} = 11421,9$  А.

## 2.2. Электрическая дуга и дугогашение

### 2.2.1. Понятие электрическая дуга

**Электрическая дуга** является одним из видов газового разряда (явление прохождения тока через газ).

Дуга (дуговой разряд) возникает при размыкании (замыкании) электрических цепей с помощью контактов электрических аппаратов (выключателей, автоматов, контакторов, пускателей, рубильников, реле), если величины токов и напряжений превосходят некоторые критические значения. Эти значения зависят от материала контактов, пара-

метров цепи, свойств среды и т.д. Дуговой разряд имеет место при относительно больших токах (для металлов – примерно 0,5 А) и при напряжении в цепи не менее 15 В. При меньших значениях тока и напряжения размыкание контактов сопровождается образованием искр.

Дуговой разряд в газовой среде относительно высокой плотности характеризуется ясно очерченной границей между столбом дуги и окружающей средой, высокой плотностью тока в столбе дуги (десятки-сотни ампер на миллиметр), высокой температурой газа внутри столба дуги (5000–25000 К), высокой плотностью тока на катоде и малым напряжением у катода (10–20 В).

Дуга приводит к значительному износу аппарата, но, с другой стороны, играет положительную роль. При отключении постоянного тока значительная часть электромагнитной энергии, запасенной в цепи, преобразуется в тепловую энергию дуги, которая отводится в окружающую среду. Это ведет к снижению перенапряжений, опасных для изоляции оборудования. При переменном токе процесс гашения дуги проходит вблизи нулевой паузы тока, когда электромагнитная энергия цепи близка к нулю. В результате этого вероятность появления опасных перенапряжений резко уменьшается.

### 2.2.2. Физические процессы в электрической дуге

В обычных условиях воздух является хорошим изолятором. Для того чтобы воздух стал хорошим проводником, необходимо создать в нем определенную концентрацию заряженных частиц – отрицательных (свободные электроны) и положительных ионов. Процесс отделения от нейтральной частицы одного или нескольких электронов и образования свободных отрицательных электронов и положительных ионов называется **ионизацией**. Ионизация газа может происходить под действием света, рентгеновских лучей, температуры, электрического поля и других факторов.

В дуговом разряде можно различить три **характерные области: околокатодную, околоанодную и область столба дуги.**

На рис. 11 показано изображение канала дуги между металлическими контактами и распределение напряжения вдоль него.

Для дуговых процессов в электрических аппаратах наибольшее значение имеют: у электродов – **термоэлектронная эмиссия** (явление испускания электронов из накаливаемой поверхности) и **автоэлектронная эмиссия** (явление испускания электронов из катода под воздействием сильного электрического поля), а в дуге (дуговом промежутке) – **термическая ионизация** (процесс ионизации под действием высокой тем-



пературы) и **ионизация толчком** (явление выбивания свободным электроном другого свободного электрона при столкновении с атомом или молекулой, в результате которого получается новый свободный электрон и положительный ион).

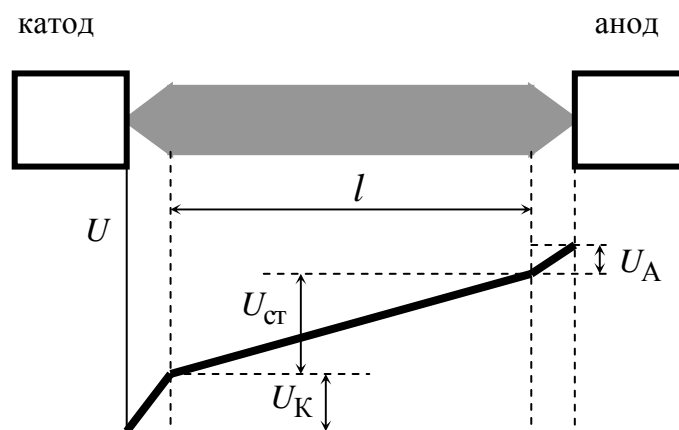


Рис. 11. Канал дуги и распределение напряжения вдоль него

Катодная область имеет основное значение в процессе формирования дуги. Средняя напряженность электрического поля у катода составляет  $10^5$  В/см и выше. При таких напряженностях выход электронов с поверхности катода может осуществляться за счет автоэлектронной эмиссии. Если температура кипения материала катода превышает 2500 К, эмиссия электронов с поверхности катода может происходить и за счет термических процессов (термоэлектронная эмиссия). Возможно совместное существование термической и автоэлектронной эмиссии при нагретом катоде.

Анодное падение напряжения не является необходимым условием существования дуги. Анод принимает идущий к нему из зоны плазмы дуги электронный поток. Повышение напряженности электрического поля у анода объясняется образованием у анода пространственного отрицательного заряда из-за недостатка ионов. Величина анодного напряжения зависит от температуры анода, рода металла и пр. Часто температура анода бывает выше температуры катода.

Область столба дуги занимает большую часть пространства между катодом и анодом. Столб дуги – это квазинейтральная высокоионизированная среда. Он является газовым проводником, соединяющим электродные области. Основным источником ионов и электронов в столбе дуги является термическая ионизация. С ростом давления степень ионизации уменьшается. В связи с этим во многих дугогасящих устройствах (ДГУ) электрических аппаратов создается повышенное

давление газа, которое способствует гашению дуги. Так как степень ионизации определяется температурой, во всех ДГУ стремятся отводить тепло от дуги либо за счет охлаждения движущимся воздухом или газом (воздушные, масляные выключатели), либо за счет отдачи тепла стенкам дугогасительной камеры.

В столбе дуги протекают также процессы **деионизации** (образование нейтральных частиц, т.е. воссоединение заряженных частиц) за счет **рекомбинации** (процесс образования нейтральных частиц при взаимном соприкосновении заряженных частиц) и **диффузии** (процесс выноса заряженных частиц из дугового промежутка в окружающее пространство, обусловленный электромагнитными и тепловыми факторами).

При возникновении дуги преобладают процессы ионизации, а в устойчиво горящей дуге процессы ионизации и деионизации одинаково интенсивны. При преобладании процессов деионизации дуга гаснет.

Падение напряжения в дуговом столбе  $U_{ст} = El$  (здесь  $E$  – напряженность электрического поля;  $l$  – длина столба).

В некоторых аппаратах низкого напряжения длина дуги невелика. Падение напряжения на столбе дуги мало по сравнению с суммой падения напряжения у анода и катода ( $U_A + U_K$ ). Такие дуги называются короткими.

В аппаратах высокого напряжения падение напряжения на столбе дуги значительно больше околоэлектродных. Условия существования таких дуг, называемых длинными, определяются процессами в столбе дуги. Для длинных дуг  $U_d \approx U_{ст} = El$ .

Напряженность электрического поля в столбе дуги обычно одинакова по длине. Величина напряженности зависит от условий, в которых горит дуга, и от свойств дугогасящей среды и составляет 10–200 В/см. Меньшие значения относятся к открытым дугам в воздухе при относительно больших токах, большие – к дугам, находящимся в потоке газов или паров жидкости при интенсивном отборе тепла от столба дуги.

### 2.2.3. Вольт-амперные характеристики дуги

**Вольт-амперные характеристики (ВАХ)** дуги устанавливают связь между значением тока и падением напряжения между электродами при неизменной длине дуги и неизменных условиях ее горения. Они позволяют представить дугу при гашении как нелинейное изменяющееся во времени сопротивление, включенное в размыкаемую цепь.

ВАХ, снятая при медленном изменении тока, называется статической. *Статическая ВАХ* зависит от расстояния между электродами

Статические вольт-амперные характеристики изображены на рис. 12. Чем больше длина дуги, тем выше лежит ее статическая ВАХ. На ВАХ влияние оказывают также скорость перемещения дуги в поперечном направлении и условия ее гашения.

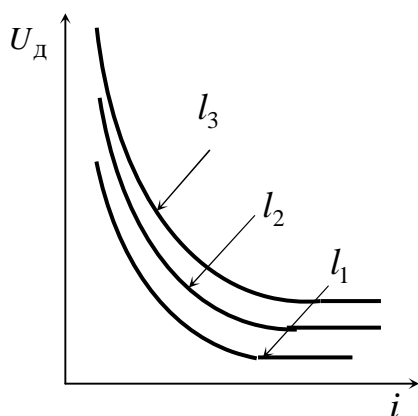


Рис. 12. Статические вольт-амперные характеристики дуги

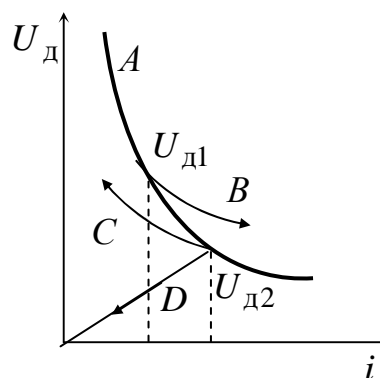


Рис. 13. Вольт-амперные характеристики дуги

Одно из возможных выражений для статической вольт-амперной характеристики дуги выглядит следующим образом:

$$U_{\Pi} = El = Ci^{-a}l, \quad (16)$$

где  $U_d$  – напряжение дуги;  $i$  – ток дуги;  $E$  – напряженность электрического поля в столбе дуги;  $l$  – длина дуги;  $C$  и  $a$  – числовые коэффициенты, определяемые экспериментально.

В реальных установках ток может изменяться довольно быстро. Вследствие тепловой инерции столба дуги изменение сопротивления отстает от изменения тока. ВАХ при быстром изменении тока называется динамической. При возрастании тока *динамическая ВАХ* (кривая *В*, рис. 13) идет выше статической (кривая *А*, рис. 13), так как сопротивление дуги падает медленнее, чем растет ток. При уменьшении – ниже,

поскольку в этом режиме сопротивление дуги меньше, чем при медленном изменении тока (кривая  $C$ , рис. 13).

Динамическая ВАХ зависит от скорости изменения тока в дуге. Если в цепь ввести большое сопротивление за время, бесконечно малое по сравнению с тепловой постоянной времени дуги, то во время спада тока до нуля сопротивление дуги остается постоянным. В этом случае ВАХ изобразится прямой  $D$  (рис. 13), т.е. дуга ведет себя как металлический проводник и напряжение на дуге пропорционально току.

Теоретическое исследование динамических ВАХ дуги проводится на основе энергетических соотношений. Математическое описание динамических ВАХ является основой для исследования и расчета динамического состояния электрических дуг и процессов электродугового замыкания электрических цепей.

#### 2.2.4. Условия гашения дуги

Общее условие гашения электрической дуги может быть сформулировано следующим образом: электрическая дуга между контактами аппарата погаснет и межконтактный промежуток приобретет свойства диэлектрика, если в каждый момент времени электрическая прочность промежутка будет выше напряжения на нем. Если же в какой-либо момент времени напряжение на межконтактном промежутке станет выше прочности этого промежутка, то процесс гашения дуги прекратится.

Процесс гашения электрической дуги в цепях с источником постоянного напряжения можно рассматривать как нарушение устойчивости в системе, в результате которого ток снижается до нуля.

На рис. 14 представлена линейная цепь с дугой неизменной длины, имеющая источник постоянного напряжения.

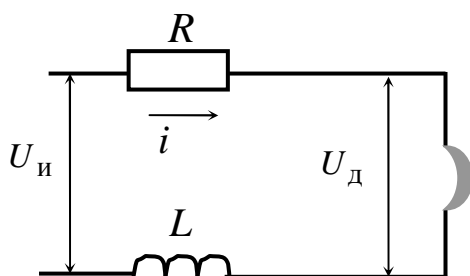


Рис. 14. Электрическая цепь постоянного тока с дугой

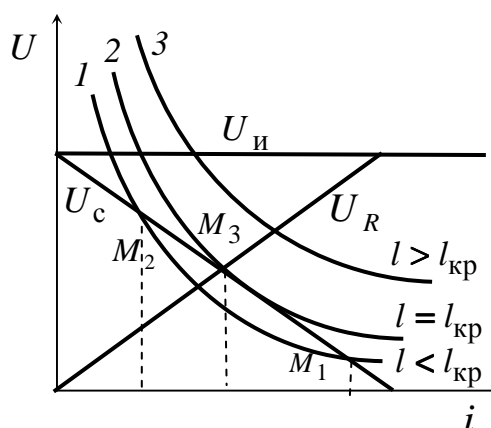


Рис. 15. Вольт-амперные характеристики дуги

Из уравнения равновесия напряжения  $U_{\text{и}} = Ri + L di / dt + U_{\text{д}}$  для этой цепи следует выражение для производной тока  $di / dt = (1 / L)(U_{\text{с}} - U_{\text{д}})$  (здесь  $U_{\text{с}} = U_{\text{и}} - Ri$  – воздействующее на дугу напряжение сети – реостатная характеристика).

Условие уменьшения тока дуги во времени ( $di / dt < 0$ ) выполняется, если при всех значениях тока ( $0 < i < \infty$ ) напряжение дуги  $U_{\text{д}} > U_{\text{с}}$ .

На рис. 15 показаны статические вольт-амперные характеристики дуги (кривые 1, 2, 3). Здесь же приведена величина напряжения источника  $U_{\text{и}}$  и вольт-амперная характеристика сопротивления цепи  $U_{\text{R}} = Ri = f(i)$ .

Длина дуги, при которой статическая вольт-амперная характеристика дуги касается прямой  $U_{\text{и}} - iR$ , называется **критической**.

Предельное условие для гашения дуги наступает при  $U_{\text{д}} = U_{\text{с}}$ , когда эти характеристики соприкасаются в некоторой точке  $M_3$ , т.е. когда длина дуги достигает критической ( $l = l_{\text{кр}}$ ) при заданных внешних условиях.

Можно показать, что в точке  $M_1$  существует условие стабильного горения дуги ( $di / dt = 0$ ), а в точке  $M_2$  – состояние неустойчивого равновесия в системе (случайные малые отклонения тока в ту или иную сторону приводят или к увеличению тока до  $I_1$ , или уменьшают его до нуля). Если по какой-то причине  $i < I_2$ , то  $U_{\text{д}} > U_{\text{с}}$ , а  $di / dt < 0$  и ток упадет до нуля. Если  $i > I_2$ , то  $U_{\text{д}} < U_{\text{с}}$ , т.е. в цепи оказывается избыточное напряжение, которое приведет к возрастанию тока до значения  $I_1$ . При любом значении тока  $I_2 < i < I_1$  ток будет возрастать до  $I_1$ .

Точка  $M_1$  является точкой устойчивого равновесия, так как при выходе из нее возникают процессы, возвращающие состояние цепи снова в эту точку. При  $i > I_1$  оказывается, что  $U_{\text{д}} > U_{\text{с}}$ , а  $di / dt < 0$ , т.е. для поддержания такого тока напряжения недостаточно. Ток в цепи будет падать до значения  $I_1$ , что приведет к устойчивому горению дуги.

**Гашение дуги постоянного тока** обеспечивается, если ВАХ дуги лежит выше реостатной характеристики отключаемой сети. Условия гашения дуги можно достичь поднятием вольт-амперной характеристики (за счет увеличения длины дуги до критической, интенсивного охлаждения, повышения давления среды, в которой горит дуга), увеличением  $R$  (за счет введения балластного сопротивления) или шунтированием дуги активным сопротивлением.

Напряжение на контактах в момент достижения током нулевого значения называется **напряжением гашения дуги**.

При  $i = 0$  уравнение  $U_{\text{и}} = Ri + Ldi / dt + U_{\text{д}}$  имеет вид

$$\begin{aligned} U_{\text{и}} &= Ldi / dt + u_{\text{гаш}}; \\ u_{\text{гаш}} &= U_{\text{и}} - Ldi / dt. \end{aligned} \quad (17)$$

Так как  $Ldi / dt < 0$ , можно написать, что

$$u_{\text{гаш}} = U_{\text{и}} + |Ldi / dt|_{i=0}. \quad (18)$$

Для оценки перенапряжения вводится понятие **коэффициент перенапряжений**:

$$k = u_{\text{гаш}} / U_{\text{и}} = 1 + |Ldi / dt|_{i=0} / U_{\text{и}}. \quad (19)$$

Из выражения для перенапряжения  $\Delta U = -Ldi / dt$  можно определить время угасания дуги

$$t_{\text{д}} = -\frac{L}{\Delta U} \int_0^I di. \quad (20)$$

Решая уравнение (16) совместно с уравнением устойчивого состояния дуги  $U_{\text{и}} = U_{\text{д}} + iR$ , получим значение  $l$  в функции  $i$ :

$$l = \frac{i^a U_{\text{и}}}{C} \left(1 - \frac{iR}{U_{\text{и}}}\right) = \frac{i^a U_{\text{и}}}{C} \left(1 - \frac{i}{I}\right), \quad (21)$$

где  $I$  – ток цепи, ограниченный собственным сопротивлением цепи  $R$ .

Если взять производную от  $l$  по  $i$  (21) и приравнять ее нулю (условие максимума), то получим критический ток

$$i = i_{\text{кр}} = I \frac{a}{1+a} = \frac{U_{\text{и}}}{R} \left(\frac{a}{1+a}\right). \quad (22)$$

Подстановкой выражения (22) в уравнение (21) можно определить критическую длину дуги

$$l_{\text{кр}} = \frac{a^a}{(1+a)^{1+a}} \cdot \frac{I^a U_{\text{и}}}{C}. \quad (23)$$

Умножив обе части уравнения электрического равновесия в цепи на  $idt$  и проинтегрировав полученное выражение, будем иметь

$$\int_0^t U_{\text{и}} idt = \int_0^t i^2 R dt + \int_0^t u_{\text{д}} idt + \int_{I_{\text{к}}}^0 L idt. \quad (24)$$

После преобразований получим выражение для определения энергии дуги

$$A_{\text{д}} = \int_0^{t_{\text{д}}} u_{\text{д}} i dt = \int_0^{t_{\text{д}}} U_{\text{и}} i dt - \int_0^{t_{\text{д}}} i^2 R dt + LI^2 / 2. \quad (25)$$

При электродуговом размыкании цепей переменного тока в межконтактном промежутке протекают три процесса: горение дуги в подавляющей части каждого полупериода тока; распад плазмы столба дуги в течение весьма короткого времени в конце каждого полупериода тока (в так называемой околонулевой области тока) при определенном характере воздействия на дугу окружающей среды и восстанавливающегося напряжения сети; восстановление электрической прочности межконтактного промежутка. При переменном токе нарастающую с относительно большой скоростью прочность межконтактного промежутка называют восстанавливающейся прочностью.

Дуга переменного тока обычно гасится легче, чем дуга постоянного тока, так как при переменном токе в дуге (независимо от степени ионизации дугового промежутка) ток переходит через ноль каждый полупериод, т.е. каждый полупериод дуга гаснет и зажигается вновь. Задача гашения дуги переменного тока заключается в том, чтобы создать такие условия, при которых ток не восстанавливался бы после прохождения через ноль.

**Условие гашения дуги переменного тока** определяется на основе сопоставления кривых восстанавливающегося напряжения сети и восстанавливающейся прочности за переходом тока через нулевое значение. Для гашения дуги необходимо, чтобы кривая восстанавливающейся прочности лежала выше кривой восстанавливающегося напряжения.

Оценка возможных условий гашения дуги переменного тока основывается на решении системы дифференциальных уравнений, описывающих динамические свойства области столба дуги, и уравнений, характеризующих переходные электромагнитные процессы в размыкаемой цепи для околонулевой области тока. Для решения системы уравнений применяются различные приближенные методы: аналитические, численные, графо-аналитические, методы теории устойчивости.

При размыкании электрической цепи на контактах восстанавливается напряжение. В зависимости от параметров цепи процесс восстановления напряжения может быть апериодическим или колебательным.

**Апериодический процесс** имеет место, если

$$\frac{1}{4} \left( \frac{R}{L} - \frac{1}{rC} \right)^2 > \frac{1}{LC}, \quad (26)$$

где  $r$  и  $C$  – активное сопротивление и емкость, включенные параллельно с контактами.

В случае аperiodического процесса восстанавливающееся напряжение  $u_B$  изменяется следующим образом:

$$u_B = U_0 \left[ 1 + \frac{1}{p_1 - p_2} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}) \right], \quad (27)$$

где  $U_0$  – мгновенное значение напряжения источника в момент перехода тока через нуль.

Корни характеристического уравнения определяются на основе решения характеристического уравнения

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2} \left( \frac{R}{L} + \frac{1}{rC} \right) \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{R}{L} + \frac{1}{rC} \right)^2 - \frac{1}{LC}}. \quad (28)$$

Скорость восстанавливающегося напряжения определяется как

$$du_B / dt = U_0 \frac{p_1 p_2}{p_1 - p_2} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}). \quad (29)$$

**Колебательный процесс** имеет место, если

$$\frac{1}{4} \left( \frac{R}{L} - \frac{1}{rC} \right)^2 < \frac{1}{LC}. \quad (30)$$

Изменение напряжения на контактах при колебательном процессе имеет вид

$$u_B = U_0 \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 t - \cos \omega_0 t \right) e^{\alpha t} \right], \quad (31)$$

где  $\omega_0 = \sqrt{1/LC - (1/4)[R/L - 1/(rC)]^2}$  – угловая частота свободных колебаний;  $\alpha = -(1/2)[R/L + 1/(rC)]$  – показатель затухания.

При  $\omega_0 \gg \alpha$

$$u_B = U_0 [1 - e^{\alpha t} \cos \omega_0 t]. \quad (32)$$

Наибольшее значение восстанавливающегося напряжения характеризуется коэффициентом превышения амплитуды

$$K = U_{B \max} / U_0 = 1 + e^{\alpha \frac{\pi}{\omega_0}}. \quad (33)$$

Средняя скорость восстановления напряжения (первая четверть периода собственных колебаний  $T$ )

$$v_{cp} = du_B / dt_{cp} = 4 f_0 U_0, \quad (34)$$

где  $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ .



### 2.2.5. Способы гашения дуги. Дугогасительные устройства

**Задача конструирования дугогасительного устройства (ДГУ)** состоит в том, чтобы обеспечить гашение дуги за малое время с допустимым уровнем перенапряжений, при минимальном объеме раскаленных газов и износе частей аппарата, с минимальным звуковым, тепловым и световым эффектами.

Гашение электрической дуги обеспечивается увеличением ее электрического сопротивления, снижением тока до критических значений и рассеянием остаточного газоразрядного канала.

Для гашения дуги постоянного тока стремятся повысить напряжение на дуге (и ее сопротивление) или путем ее растяжения, или путем повышения напряженности электрического поля в дуговом столбе, а чаще всего – одновременно тем и другим путем. Также можно добиться увеличения суммы падений напряжений у электродов ( $U_A + U_K$ ). Последнее достигается увеличением количества металлических электродов, разбивающих дугу на ряд коротких дуг. Увеличение напряженности в столбе дуги достигается путем эффективного охлаждения дуги и подъема давления среды, в которой она горит. Охлаждение дуги можно создать за счет перемещения дуги в воздухе или газе, за счет их перемещения относительно дуги либо размещения дуги в узкой щели, стенки которой имеют высокую теплопроводность и дугостойкость.

Простейший способ гашения дуги – *механическое растяжение столба дуги*. При небольших токах (примерно до 10 А) дуга 1 (рис. 16, а) растягивается между контактами на длину  $l$  и не выходит из межконтактного промежутка. При значительных токах столб дуги 2 (рис. 16, а) выдувается вверх под действием сил, вызываемых тепловыми потоками, или сил электродинамического взаимодействия тока дуги  $D$  на участке  $бв$  с токами в токоведущих элементах  $аб$  и  $вг$ . В таких устройствах гасится свободная (открытая) дуга.

Широко применяются *дугогасительные решетки* (рис. 16, б), набранные из стальных пластин  $\Pi$ , на которые выдувается электрическая дуга. Пластины, разбившие столб дуги на ряд коротких дуг 1-6, являются своеобразными радиаторами, интенсивно их охлаждающими.

Весьма часто в ДГУ постоянного тока применяют *магнитное дутье* (рис. 16, в), т.е. создают в зоне горения дуги поперечное магнитное поле, которое увеличивает скорость перемещения (и растяжения) дуги и способствует вхождению столба дуги в узкие щели между изоляционными стенками (рис. 16, г). Магнитное поле может быть создано обмотками, обтекаемыми отключаемым током (последовательное магнитное дутье), параллельными обмотками или постоянными магнитами.

Описанные ДГУ применяются в аппаратах низкого напряжения.

В аппаратах высокого напряжения используют более интенсивные способы воздействия на столб дуги.

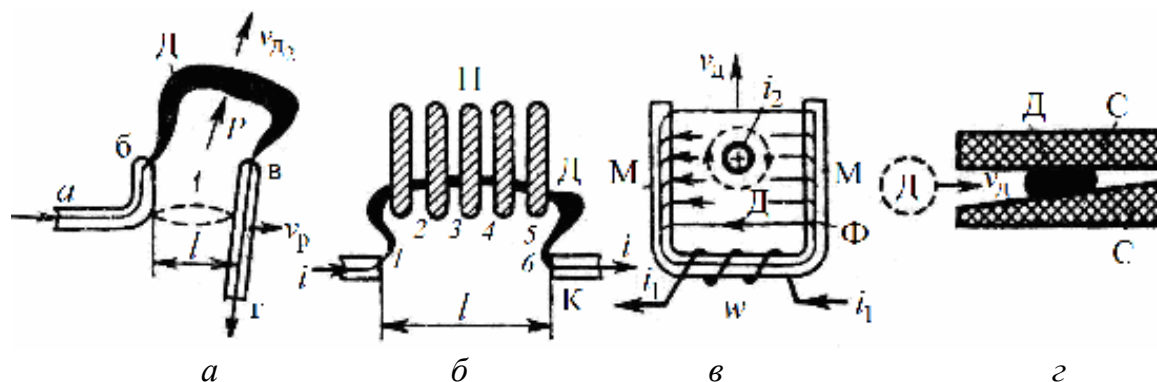


Рис. 16. ДГУ низкого напряжения

**При гашении дуги в трансформаторном масле** (рис. 17, а) дуга (Д) разлагает масло (М) и образуется газопаровой пузырь (ГП), обладающий высокой теплопроводностью. Возникающее бурное перемешивание смеси из масла, его паров и газов обуславливает гашение дуги.

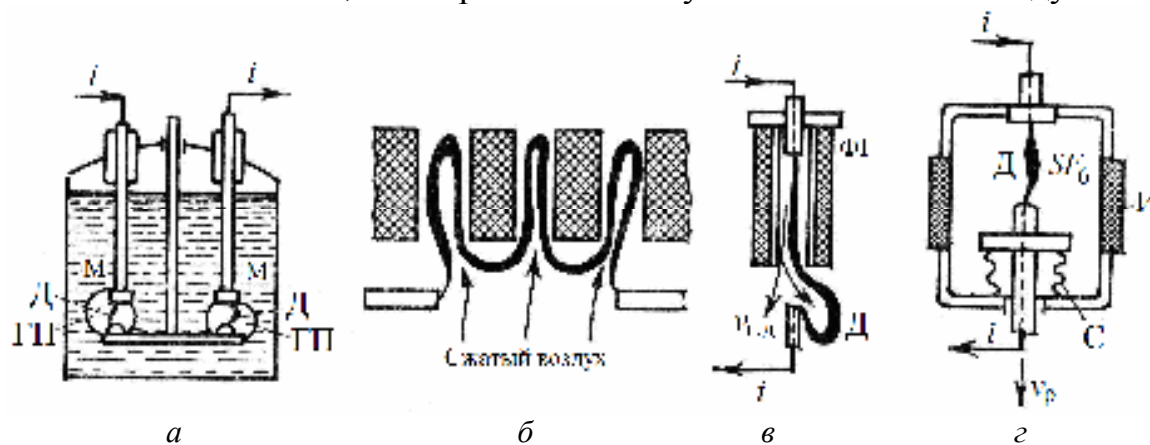


Рис. 17. ДГУ высокого напряжения

**Поток сжатого воздуха** (рис. 17, б), воздействующий на дугу, интенсивно ее охлаждает и растягивает столб, особенно если на пути находятся изолирующие перегородки.

Для гашения дуги можно использовать **эффект выделения газов** (рис. 17, в) из некоторых материалов. Дуга, соприкасаясь с фибровой трубкой (ФТ), дает поток газов, который охлаждает и гасит дугу.

В **герметизированных ДГУ** (рис. 17, г) дугогасящей средой является элегаз или вакуум. Хорошие дугогасящие свойства элегаза опреде-

ляются его высокой теплоотводящей способностью и спецификой химических реакций в условиях гашения дуги. Резкое снижение концентрации газовых частиц в вакууме снижает возможность возникновения носителей тока (электронов и ионов). В результате пробивные напряжения промежутков в вакууме повышаются в 4-5 раз в сравнении с воздухом при атмосферном давлении. При прохождении переменного тока через нуль возможность для переноса тока исчезает и дуга гасится. Способ гашения электрической дуги, связанный с интенсивным охлаждением столба дуги в потоках сжатого газа, широко применяется в ДГУ воздушного или элегазового дутья выключателей переменного тока высокого и сверхвысокого напряжения.

Полное исключение дуги достигается в бесконтактных аппаратах, широкое распространение среди которых нашли полупроводниковые аппараты.

### 2.2.6. Примеры решения задач

**Пример 1.** Определить энергию, поглощенную дугой постоянного тока при её гашении, если напряжение источника  $U = 200$  В, сопротивление  $R = 1$  Ом, индуктивность  $L = 100$  мГн, время угасания дуги  $t_d = 0,1$  с, спад тока происходит по прямой.

*Решение.* Исходя из уравнения равновесия напряжений при гашении дуги постоянного тока  $U = iR + u_d + L di / dt$ , получаем выражение энергии дуги

$$A_d = \int_0^{t_d} u_d i dt = \int_0^{t_d} U i dt - \int_0^{t_d} i^2 R dt + LI^2 / 2,$$

где  $I = U / R = 200 / 1 = 200$  А – ток в цепи.

По условию задачи ток в зависимости от времени спадает по прямой линии, т.е.  $i = I(1 - t / t_d)$ .

Тогда

$$\begin{aligned} A_d &= U I t_d / 6 + L I^2 / 2 = \\ &= 200 \cdot 200 \cdot 0,1 / 6 + 100 \cdot 10^{-3} \cdot 200^2 / 2 = 2667 \text{ Дж.} \end{aligned}$$

*Ответ:*  $A_d = 2667$  Дж.

**Пример 2.** Определить время угасания дуги постоянного тока, если индуктивность цепи  $L = 0,1 \cdot 10^{-3}$  Гн, перенапряжение  $\Delta U = 30$  В остается величиной постоянной, напряжение источника  $U = 400$  В, сопротивление цепи  $R = 2$  Ом.

*Решение.* Установившийся ток цепи  $I = U / R = 400 / 2 = 200$  А.

Из выражения для перенапряжения  $\Delta U = -L di / dt$  определим время угасания дуги по формуле (20):

$$t_d = -\frac{L}{\Delta U} \int_I^0 di = \frac{LI}{\Delta U} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3}}{30} 200 = 0,67 \cdot 10^{-3} \text{ с.}$$

*Ответ:*  $t_d = 0,67 \cdot 10^{-3}$  с.

**Пример 3.** Определить критическую длину дуги постоянного тока и критический ток дуги для цепи с общим сопротивлением  $R = 1,2$  Ом при напряжении источника  $U = 400$  В. Выражение вольт-амперной характеристики имеет вид  $U_d = Ci^{-a}l$ , где  $C = 80$ ,  $a = 0,5$ .

*Решение.* Из выражения для вольт-амперной характеристики определяем критические значения длины и тока дуги по формулам (23), (22):

$$l_{кр} = \frac{a^a}{(1+a)^{1+a}} \cdot \frac{I^a U}{C} = \frac{0,5^{0,5}}{(1+0,5)^{1+0,5}} \cdot \frac{333^{0,5} 400}{80} = 35 \text{ см;}$$

$$i_{кр} = \frac{U}{R} \cdot \frac{a}{1+a} = \frac{400}{1,2} \cdot \frac{0,5}{1+0,5} = 111 \text{ А.}$$

*Ответ:*  $l_{кр} = 35$  см;  $i_{кр} = 111$  А.

**Пример 4.** Определить возможное напряжение в цепи постоянного тока, если происходит её размыкание без дуги, при условии, что к зажимам индуктивности  $L = 1,5$  Гн подключена ёмкость  $C = 0,1$  мкФ. Ток в цепи  $I = 20$  А.

*Решение.* Если пренебречь активным сопротивлением цепи, то ожидаемое напряжение может быть определено из условия, что вся электромагнитная энергия переходит в электростатическую  $LI^2 / 2 = CU^2 / 2$ , откуда

$$U = I \sqrt{L/C} = 20 \sqrt{1,5 / (0,1 \cdot 10^{-6})} = 77460 \text{ В.}$$

*Ответ:*  $U = 77460$  В.

**Пример 5.** Определить число стальных пластин в дугогасительной решетке, учитывая, что прочность должна нарастать во времени и увеличиться в два раза по сравнению с начальной величиной через 100 мкс. Действующее значение напряжения  $U = 600$  В. Напряжение восстанавливается с частотой  $f_0 = 5000$  Гц. Коэффициент превышения амплитуды  $K = 1,4$ . Начальное расчетное пробивное напряжение единичного промежутка  $U_{пр1} = 120$  В.

*Решение.* Амплитуда восстанавливающегося напряжения определяется по формуле  $U_{в\max} = K\sqrt{2}U = 1,4 \cdot \sqrt{2} \cdot 600 = 1188 \text{ В}$ .

Через 100 мкс пробивное напряжение единичного промежутка составит  $U_{\text{пр1}(t=100 \text{ мкс})} = 2U_{\text{пр1}} = 2 \cdot 120 = 240 \text{ В}$ .

Полупериод собственной частоты  $\tau = 1 / (2f_0) = 1 / (2 \cdot 5000) = 10^{-4} \text{ с}$ .

Таким образом, через 100 мкс пробивное напряжение единичного промежутка составляет 240 В, а амплитуда восстанавливающегося напряжения – 1188 В.

Число пластин в дугогасительной решетке (при 20%-м запасе)

$$m = 1 + 1,2U_{в\max} / U_{\text{пр1}(t=100 \text{ мкс})} = 1 + 1,2 \cdot 1188 / 240 \approx 6.$$

*Ответ:*  $m = 6$ .

**Пример 6.** Определить частоту собственных колебаний восстанавливающегося напряжения выключателя, декремент затухания колебаний и коэффициент превышения амплитуды при условии, что индуктивное сопротивление контура  $x = \omega L = 30 \text{ Ом}$ , емкость  $C = 20000 \text{ пФ}$ , активное сопротивление  $R = 400 \text{ Ом}$ , шунтирующее контакты сопротивление  $r = \infty$ , частота напряжения питания  $f = 50 \text{ Гц}$ .

*Решение.* Индуктивность контура  $L = x / \omega = 30 / 314 = 0,0955 \text{ Гн}$ .

Процесс восстановления напряжения будет колебательным, так как

$$\begin{aligned} \frac{1}{4} \left( \frac{R}{L} - \frac{1}{rC} \right)^2 &= \frac{1}{4} (400 / 0,0955 - 0)^2 = 4,4 \cdot 10^6 < \frac{1}{LC} = \\ &= 1 / (0,0955 \cdot 20000 \cdot 10^{-12}) = 523,6 \cdot 10^6. \end{aligned}$$

Угловая частота колебаний восстанавливающегося напряжения

$$\omega_0 \approx \sqrt{\frac{1}{LC}} \approx \sqrt{\frac{1}{0,0955 \cdot 20000 \cdot 10^{-12}}} = 23000 \text{ 1/с}.$$

Частота собственных колебаний восстанавливающегося напряжения

$$f_0 = \omega_0 / (2\pi) = 23000 / (2 \cdot 3,14) = 3662,4 \text{ Гц}.$$

Декремент затухания при  $r = \infty$

$$\alpha = -\frac{R}{2L} = -\frac{400}{2 \cdot 0,0955} = -2105 \text{ 1/с}.$$

Коэффициент превышения амплитуды по формуле (2.20)

$$K = U_{в\max} / U_0 = 1 + e^{\alpha \frac{\pi}{\omega_0}} = 1 + e^{-2105 \frac{3,14}{23000}} = 1,75.$$

*Ответ:*  $f_0 = 3662,4 \text{ Гц}$ ,  $\alpha = -2105 \text{ 1/с}$ ,  $K = 1,75$ .

## 2.3. Нагрев и охлаждение электрических аппаратов

Тепловые явления можно рассматривать как полезные, если они используются для построения аппаратов, и как вредные, приводящие к старению элементов аппаратов.

Существуют следующие **направления использования тепловых явлений**: расширение тел при нагревании (например, в приводном механизме контактной системы коммутационных аппаратов), искусственное создание неблагоприятных тепловых условий с целью разрушения элемента аппарата и отключения цепи (например, в плавких предохранителях), преобразование в контактных выключателях электрической энергии в тепловую энергию электрической дуги.

### 2.3.1. Ограничения температуры элементов аппаратов

При работе электрического аппарата происходит преобразование энергии из одних видов в другие. При этом часть энергии преобразуется в тепловую энергию (тепло), которую принято называть потерями.

Тепло приводит к нагреву элементов аппаратов. Повышение температуры ведет к старению изоляции проводников, снижению их механической прочности и надежности работы аппарата. Во всех возможных режимах работы температура элементов аппарата не должна превосходить значений, при которых обеспечивается заданный срок службы аппарата.

**Предельные температуры** элементов аппаратов определяются свойствами применяемых проводниковых, изоляционных и конструктивных материалов, длительностью температурных воздействий и назначением аппарата. Допустимые превышения температуры над температурой окружающего воздуха для отдельных элементов аппаратов регламентируются стандартами и приводятся в справочниках (табл. П2–П3). При этом температура окружающего воздуха принимается равной 35 или 40 °С.

По условиям нагрева изоляции допустимая температура лежит в пределах 90–180 °С. Стандарт допускает температуру нагрева для электрических контактов из меди и медных сплавов, работающих в воздухе, без покрытий – 75 °С, в масле – 80 °С, в элегазе – 90 °С.

Для нетоковедущих элементов электрических аппаратов высокого напряжения, не соприкасающихся с изоляционными материалами, допустимая температура в воздухе – 100 °С, в масле – 90 °С.

В низковольтных электрических аппаратах допустимые температуры нетоковедущих элементов определяются также требованиями техни-

ки безопасности обслуживающего персонала при прикосновении к ним и не превышают 100 °С.

В большинстве случаев аппараты рассчитываются для работы на высоте не более 1000 м над уровнем моря.

С ростом высоты падает плотность воздуха, в связи с чем ухудшаются условия охлаждения. На высоте 3000 м токовая нагрузка аппаратов должна быть снижена на 4 %, а при высоте 6000 м – на 10 %.

### 2.3.2. Задачи теплового расчета

Тепловые расчеты электрических аппаратов производят для определения допустимой мощности, величины охлаждающей поверхности, способа и параметров охлаждения, максимальной температуры элементов аппарата.

**Задачей теплового расчета** является определение мощности потерь и расчет температурного поля, которое является функцией координат и времени  $\theta = f(x, y, z, t)$ . В установившемся (статическом) режиме температура зависит только от координат точки в пространстве. В переходном (неустановившемся) режиме температурное поле изменяется во времени.

Для решения задач теплового расчета используются аналитические методы (при различных упрощающих предположениях) и вычислительные методы математики (методы сеток, конечных элементов).

### 2.3.3. Источники тепла в электрических аппаратах.

#### Расчет мощности потерь

Потери электрической энергии *при протекании тока по проводнику* определяются согласно закону Джоуля – Ленца.

**Мощность потерь** в случае однородного по всей длине проводника и установившейся температуры нагрева для постоянного тока  $I$  проводится по формуле

$$P = I^2 R, \quad (35)$$

где  $R = \rho l / q$  – активное сопротивление проводника поперечного сечения  $q$  длиной  $l$ ;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление проводника.

Для большинства проводников при температурах до 200–300 °С в практических расчетах можно считать, что  $\rho = \rho_0(1 + \alpha_\theta \theta)$ . Здесь  $\rho_0$  – удельное сопротивление проводника при 0 °С,  $\alpha_\theta$  – температурный коэффициент сопротивления.

При переменном токе потери увеличиваются из-за неравномерного распределения тока по сечению проводника, которое зависит от магнитного поля внутри проводника (поверхностный эффект) и от поля, создаваемого другими проводниками (эффект близости). Сопротивление проводника на переменном токе определяют как

$$R = k_{\text{доб}} R_{\text{=}}, \quad (36)$$

где  $R_{\text{=}}$  – активное сопротивление проводника на постоянном токе.

Коэффициент добавочных потерь  $k_{\text{доб}}$  учитывает поверхностный эффект и эффект близости и определяется как

$$k_{\text{доб}} = k_{\text{п}} k_{\text{б}}. \quad (37)$$

Коэффициенты поверхностного эффекта и эффекта близости  $k_{\text{п}}$  и  $k_{\text{б}}$  зависят от частоты тока, геометрии и формы проводника, свойств материала проводника; коэффициент  $k_{\text{б}}$  зависит также от расстояния между проводниками, от направления и фазы токов в них.

В отличие от коэффициента поверхностного эффекта коэффициент эффекта близости может быть больше или меньше единицы (например, при расположении тонкостенных прямоугольных проводников большими гранями параллельно, так как в этом случае близость проводников улучшает распределение тока по сечению и компенсирует поверхностный эффект).

Чем больше частота тока, меньше удельное сопротивление проводника и больше его диаметр, тем сильнее проявляется поверхностный эффект. Внутренняя часть проводника большого сечения не обтекается током и фактически не используется.

При резко выраженном поверхностном эффекте не рекомендуется применять сплошные цилиндрические проводники с диаметром более 25–30 мм, проводники из ферромагнитного материала, профили токоведущих элементов переменного тока, имеющие  $k_{\text{п}} > 1,1–1,2$ , так как это ведет к неоправданному перерасходу материалов.

С целью уменьшения мощности источников тепла применяют проводниковые материалы с малой величиной удельного сопротивления, трубчатые проводники и продольные разрезы в стальных трубах токопроводов, используют транспозицию проводников, составные шины и т.д.

При практических расчетах коэффициенты  $k_{\text{п}}$  и  $k_{\text{б}}$  определяются по номограммам и кривым, приведенным в приложении (рис. П.1–П.3).

При переменном токе появляются активные *потери в ферромагнитных нетоковедущих деталях*, расположенных в переменном магнитном поле (потери от вихревых токов и потери на гистерезис).



**Мощность потерь в стали магнитопровода** на гистерезис и вихревые токи может быть определена по формуле

$$P = (\chi_{\Gamma} B_m^{1,6} + \chi_{\text{в}} f B_m^2) f M, \quad (38)$$

где  $B_m$  – максимальное значение магнитной индукции, Тл;  $\chi_{\Gamma}$  и  $\chi_{\text{в}}$  – коэффициенты потерь от гистерезиса и вихревых токов;  $M$  – масса магнитопровода, кг;  $f$  – частота тока.

Для уменьшения потерь от вихревых токов магнитопроводы выполняют шихтованными из листов электротехнической стали толщиной 0,2–0,5 мм, изолированных друг от друга. Кроме того, используют следующие методы для уменьшения потерь в массивных деталях: увеличивают расстояние от проводника с током до ферромагнитной детали, выполняют немагнитный зазор или устанавливают короткозамкнутый виток на пути магнитного потока, применяют электромагнитный экран, изготавливают конструктивные детали из немагнитных материалов (немагнитная сталь, латунь, бронза, немагнитный чугун, алюминиевый сплав).

В аппаратах переменного тока высокого напряжения необходимо учитывать **потери в изоляции проводов и изолирующих деталях**.

Мощность, выделяемая в активном слое изоляции в переменном электрическом поле,

$$P = \omega C U^2 \operatorname{tg} \delta, \quad (39)$$

где  $C$  – емкость изолятора, Ф;  $U$  – напряжение, приложенное к изолятору, В;  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь изолятора.

Повышение температуры проводников и других элементов аппаратов происходит также **за счет дуги**, имеющей высокую температуру (3000–20000 °С).

При **трении между собой отдельных элементов аппаратов** происходит их нагрев, который может быть значительным в демпфирующих и тормозных устройствах аппаратов.

#### 2.3.4. Способы теплообмена

Различают следующие **способы теплообмена (передачи тепла): теплопроводность, конвекция, тепловое излучение или лучеиспускание**.

В токоведущих системах электрических аппаратов **теплоотдача путем теплопроводности** в основном происходит от элементов этих систем к соприкасающимся металлическим нетоковедущим конструктивным или изоляционным элементам; от наиболее нагретых элементов токоведущих систем к менее нагретым, включенным последовательно; к специальным радиаторам; к элементам системы принудительного, как

правило жидкостного, охлаждения в аппаратах с искусственным охлаждением.

Процесс теплопроводности описывается **уравнением Фурье**

$$p = -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial n}, \quad (40)$$

где  $p = P / S$  – плотность теплового потока в какой-либо точке на поверхности  $S$ ;  $P$  – мощность потерь;  $\partial \theta / \partial n$  – градиент температуры (производная от температуры вдоль нормали  $n$  к площадке  $S$ );  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °С).

Отрицательный знак обусловлен тем, что тепловая энергия распространяется от точек с большей температурой к точкам с меньшей температурой, т.е. в направлении, противоположном направлению градиента.

Коэффициент теплопроводности различных веществ зависит от их физических свойств и выбирается по таблицам (табл. П.1).

При решении задачи теплопроводности в каждом конкретном случае задаются условия однозначности, т.е. начальные и граничные условия.

**Конвективный теплообмен (теплоотдача конвекцией)** всегда сопровождается теплопроводностью, играющей существенную роль только в непосредственной близости к поверхности нагретого тела. Конвекция возможна лишь в жидкостях и газах, частицы которых могут легко перемещаться. Различают два вида движения: свободное (естественное), создаваемое разностью плотностей нагретых и холодных частиц, и вынужденное, которое возникает под действием посторонних возбудителей (ветра, насоса, вентилятора).

Теплоотдача с поверхности большинства токоведущих систем аппаратов осуществляется путем свободной конвекции. Вынужденное движение приобретает в последнее время большое значение в связи с достаточно широким применением токоведущих систем с искусственным охлаждением.

Движение жидкости может быть ламинарным (частицы жидкости движутся параллельно стенкам канала) и турбулентным (частицы жидкости движутся хаотически, неупорядоченно). Наилучшая теплоотдача от труб с жидкостью происходит при турбулентном движении, при относительно больших скоростях. Следует отметить, что водяное охлаждение усложняет конструкцию аппарата и применяется только при больших токах.

**Теплообмен (теплоотдача) излучением** сопровождается двойственным превращением энергии: тепловой в лучистую и лучистой в тепловую, при этом тепло может передаваться через вакуум. В наибольшей степени тепловую энергию переносят инфракрасные лучи и в меньшей

степени – световые. В теплоотдаче от токоведущих систем с температурой порядка 100–120 °С теплоотдача путем излучения может составлять 40–50 %.

В токоведущих системах электрических аппаратов, как правило, все виды теплоотдачи существуют одновременно. Только в некоторых случаях можно выделить отдельные виды теплоотдачи, например, перенос тепла путем излучения в вакуумных выключателях на стенки и путем теплопроводности через контактные выводы.

Мощность, отдаваемая телом за счет конвекции и излучения окружающей среде, определяется **законом Ньютона**

$$P = k_{\text{то}} S (\theta - \theta_0). \quad (41)$$

Здесь  $k_{\text{то}}$  – коэффициент теплоотдачи, учитывающий отдачу тепла конвекцией и излучением, Вт/(м<sup>2</sup> · °С);  $\theta$  – температура поверхности, °С;  $\theta_0$  – температура окружающей среды, °С.

Коэффициент теплоотдачи зависит от физических постоянных (удельного веса, теплопроводности, вязкости, теплоемкости, температуропроводности жидкой или газообразной среды, окружающей тело), от формы и расположения тела в среде, от состояния поверхности тела, его размеров, скорости движения среды, температуры и т.д.

Значения коэффициента теплоотдачи определяются экспериментально с применением теории подобия и приводятся в справочной литературе (табл. 6, 7).

Таблица 6

Эмпирические формулы  
для расчета коэффициента теплоотдачи

Конструкция	Формула
Окрашенная прямоугольная шина, находящаяся в спокойном воздухе, большая сторона сечения которой расположена вертикально	$k_{\text{то}} = 9,2 \cdot [1 + 0,9 \cdot 10^{-2} \cdot (\theta - \theta_0)], \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)}$
Горизонтальные цилиндрические окрашенные проводники, находящиеся в спокойном воздухе	$k_{\text{то}} = k_1 \cdot 10 \cdot [1 + k_2 \cdot 10^{-2} \cdot (\theta - \theta_0)], \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)}$

Таблица 7

Коэффициенты для расчета  
коэффициента теплоотдачи проводника

Диаметр проводника, мм	0,3	10	40	80	200
$k_1, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$	4,5	2,24	1,11	1,08	1,02
$k_2, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$	1,7	1,14	0,88	0,75	0,68

Следует отметить, что большую точность обеспечивает отдельный учет конвекции и теплового излучения.

Формула (41) является упрощенной и используется при инженерных расчетах. Уравнение Ньютона можно рассматривать также как тепловой закон Ома:

$$P = \frac{(\theta - \theta_0)}{1/(k_{\text{то}}S)} = \frac{(\theta - \theta_0)}{R_T}, \quad (42)$$

где  $R_T = 1/(k_{\text{то}}S)$  – тепловое сопротивление.

Понятие *тепловое сопротивление* позволяет решать многие задачи, не прибегая к решению непосредственно уравнения теплопроводности, а с помощью схем замещения.

### 2.3.5. Режимы работы и нагрева электрических аппаратов

**Режимы нагрева аппаратов** можно разделить на *установившиеся* и *переходные*.

Процесс нагрева считается *установившимся*, если за 1 час нагрева температура элементов аппарата возрастает не более чем на 1 °С. Расчет температуры для установившегося режима проводится по выражениям (35)–(41).

Для расчета температуры в переходном режиме используют уравнение теплового баланса

$$Pdt = k_{\text{то}}S(\theta - \theta_0)dt + Cd\theta. \quad (42)$$

Здесь, кроме указанных выше обозначений,  $C$  – теплоемкость тела, Вт·с;  $t$  – время, с. Первый член правой части уравнения (42) есть количество тепла, отдаваемое телом в окружающую среду за время  $dt$ ; второй член – количество тепла, воспринимаемого телом при изменении его температуры на  $d\theta$ .

Решением уравнения (42) при постоянстве подводимой мощности  $P$ , теплоемкости  $C$ , температуре окружающей среды и коэффициенте теплоотдачи является

$$\tau = \tau_0 e^{-t/T} + \tau_y (1 - e^{-t/T}), \quad (43)$$

где  $\tau_0 = \theta - \theta_0$  – превышение температуры в начале процесса;  $\tau_y = \theta_y - \theta_0$  – установившееся превышение температуры;  $T = C / (k_{\text{то}} S)$  – постоянная времени нагрева.

Зависимость  $\tau = f(t)$  при  $\tau_0 = 0$  изображена на рис. 18 (кривая 1). Касательная в начале координат к кривой  $\tau = f(t)$  отсекает на прямой  $\tau = \tau_y$  отрезок, равный постоянной времени нагрева  $T$ .

Постоянная времени нагрева представляет собой время, в течение которого тело нагрелось бы до установившейся температуры при отсутствии отдачи тепла в окружающую среду. С точностью до 1 % можно считать, что процесс установления температуры происходит за время, равное  $(4-5)T$ .

После отключения аппарата начинается его охлаждение. Зависимость  $\tau = f(t)$  при охлаждении аппарата изображена кривой 2 на рис. 18.

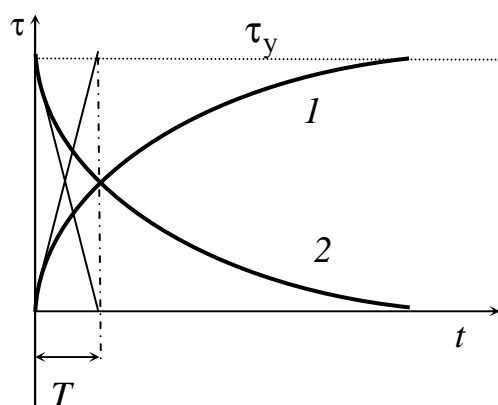


Рис. 18. Зависимость  $\tau = f(t)$

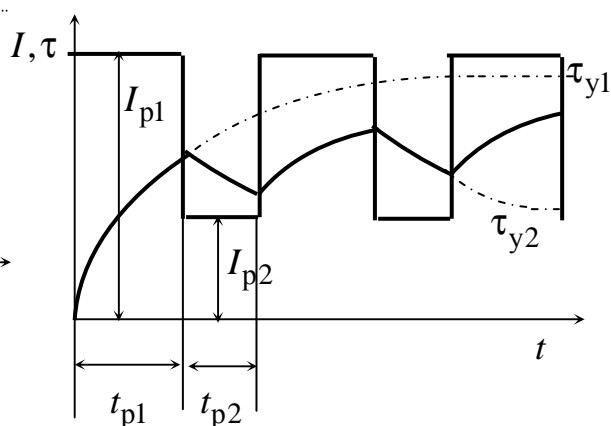


Рис. 19. Переключающийся режим

Таким образом, процессы нагрева и охлаждения целиком определяются значениями постоянной времени  $T$  и установившегося превышения температуры  $\tau_y$  при известной температуре окружающей среды  $\theta_0$  и начальной температуре.

Решение уравнения (43) является приближенным в силу сделанных допущений.

Типичными для аппаратов являются: **длительный, кратковременный, повторно-кратковременный режимы работы.**

**Длительный режим** возможен, если время действия нагрузки (время работы) в 4–5 раз превышает постоянную времени нагрева  $t_p > 4T$ . Температура достигает установившегося значения.

В **кратковременном режиме** при работе аппарата температура не достигает установившегося значения, а при отключении (пауза) аппарат охлаждается до температуры окружающей среды ( $t_p < 4T$ ,  $t_{\Pi} > 4T$ ).

Для **повторно-кратковременного режима** работы  $t_p < 4T$ ,  $t_{\Pi} < 4T$ . При отключении аппарат не успевает охладиться до температуры окружающей среды, а за время работы  $t_p$  не достигает  $\theta_y$ . Простейший случай повторно-кратковременного режима наблюдается, когда интервалы работы  $t_p$  и паузы  $t_{\Pi}$  постоянны в следующих друг за другом циклах работы и отключения ( $t_{\Sigma} = t_p + t_{\Pi}$ ).

К повторно-кратковременному режиму относится **перемежающийся режим**. При этом режиме ток циклически меняется, не спадая до нулевого значения. В течение времени работы  $t_{p1}$  проходит неизменный ток  $I_{p1}$ . Установившееся превышение температуры при этом токе равно  $\tau_{y1}$ . В течение времени работы  $t_{p2}$  через аппарат проходит неизменный ток  $I_{p2}$ . Установившееся превышение температуры при этом токе равно  $\tau_{y2}$ . Поскольку  $I_{p1} > I_{p2}$ , то в течение времени  $t_{p2}$  аппарат охлаждается.

При кратковременном и повторно-кратковременном режимах величина тока может быть принята большей, чем при длительном. Однако максимальное превышение температуры в таких режимах не должно превосходить допустимых значений.

Для аппаратов, предназначенных для работы в повторно-кратковременном режиме, нормируется продолжительность включения и допустимое число включений в единицу времени (обычно в час). Продолжительность включения ПВ определяется как

$$\text{ПВ} = \frac{t_p}{t_{\Sigma}} 100 \%. \quad (44)$$

Стандартами установлены следующие значения продолжительности включения и максимально допустимой частоты включений  $n$ : ПВ = 15, 25, 40 и 60 % ;  $n = 6, 30, 150, 600, 1200, 2400, 3600$  вкл./час.

Коэффициент перегрузки по току рассчитывается в соответствии с ПВ и частотой включений  $n$

$$k_I = I_{\text{кр}} / I_{\text{дл}} = \sqrt{\left(1 - e^{-\frac{3600}{T \cdot n}}\right) / \left(1 - e^{-\frac{3600 \text{ПВ}}{T \cdot n \cdot 100 \%}}\right)}. \quad (45)$$

### 2.3.6. Процесс нагрева при коротком замыкании. Термическая стойкость электрического аппарата

Так как время действия токов короткого замыкания значительно меньше постоянной времени нагрева токоведущих частей ( $t_{кз} < 0,05T$ ), процесс нагрева является адиабатическим (тепло не отдается в окружающую среду, а все идет на нагрев).

**Уравнение теплового баланса** преобразуется к виду

$$\int_0^{t_{кз}} j^2 dt = \int_{\theta_{нач}}^{\theta_{кз}} \frac{c\gamma}{\rho} = B(\theta_{кз}), \quad (46)$$

где  $j$  – плотность тока;  $c$  – удельная теплоемкость;  $\gamma$  – плотность материала проводника;  $\theta_{нач}$  – начальная температура;  $\theta_{кз}$  – температура в конце короткого замыкания.

По известной зависимости удельной теплоемкости, плотности и удельного сопротивления от температуры для некоторых широко распространенных материалов (сталь, алюминий, медь) построены графики  $B(\theta_{кз})$ , которые позволяют определить температуру в конце процесса

короткого замыкания. При этом значение интеграла  $\int_0^{t_{кз}} j^2 dt$  может быть

определено по кривой изменения тока короткого замыкания во времени либо другими методами (например, заменой реального процесса короткого замыкания некоторым фиктивным, эквивалентным реальному по тепловому действию). С помощью кривых  $B(\theta_{кз})$  можно определить допустимую плотность тока в проводнике либо длительность процесса короткого замыкания при известной допустимой температуре. Допустимые температуры в конце короткого замыкания: для медных неизолированных проводников или проводников с изоляцией органического происхождения – 250 °С, для медных проводников с неорганической изоляцией – 350 °С, для алюминиевых проводников – 200 °С.

Токоведущие элементы аппарата, рассчитанные для длительного режима, должны быть проверены на термическую стойкость при коротком замыкании.

**Термической стойкостью** электрического аппарата называют его способность выдерживать кратковременное тепловое действие токов короткого замыкания без повреждений. Термическая стойкость количественно оценивается током термической стойкости.

При расчете берется наиболее тяжелый случай – к моменту начала короткого замыкания элемент нагрет длительным током до предельно допустимой температуры номинального режима.

Термическая стойкость аппарата и его токоведущих частей определяется действующим значением тока термической стойкости, протекающего в течение времени термической стойкости (1, 3, 5 и 10 секунд) не вызывает нагрева выше допустимых температур. Связь между токами термической стойкости для различных времен выражается равенством

$$I_1^2 \cdot 1 = I_3^2 \cdot 3 = I_5^2 \cdot 5 = I_{10}^2 \cdot 10 = I_t^2 \cdot t. \quad (47)$$

### 2.3.7. Примеры решения задач

**Пример 1.** Определить коэффициент поверхностного эффекта для алюминиевого шинпровода, нагретого протекающим по нему переменным током промышленной частоты до температуры  $\theta = 95^\circ \text{C}$ , для следующих случаев:

- а) шинпровод круглый  $d = 80$  мм;
- б) шинпровод трубчатый с наружным диаметром  $d_{\text{нар}} = 80$  мм, внутренним диаметром  $d_{\text{вн}} = 50$  мм;
- в) шинпровод трубчатый с наружным диаметром  $d_{\text{нар}} = 80$  мм, внутренним диаметром  $d_{\text{вн}} = 74$  мм.

*Решение.* Коэффициент поверхностного эффекта можно определить по графикам, изображенным на рис. П.1 и П.2. Для этого вычисляется величина  $\sqrt{f / R_{100}}$ , где  $f$  – частота переменного тока, Гц;  $R_{100}$  – активное сопротивление постоянному току проводника длиной  $l = 100$  м, Ом.

Для условия (а) рассматриваемой задачи

$$\begin{aligned} R_{100} &= \rho_0 (1 + \alpha_\theta \theta) l / q = \\ &= 2,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0042 \cdot 95) \cdot 100 / (3,14 \cdot 40^2 \cdot 10^{-6}) = \\ &= 7,3 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}; \\ \sqrt{f / R_{100}} &= \sqrt{50 / (7,3 \cdot 10^{-4})} = 262 \text{ Гц}^{1/2} / \text{Ом}^{1/2}. \end{aligned}$$

Коэффициент поверхностного эффекта  $k_{\text{п}} = 1,8$  (рис. П.1).

Для условия (б) задачи

$$\begin{aligned} R_{100} &= \rho_0 (1 + \alpha_\theta \theta) l / q = \\ &= 2,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0042 \cdot 95) \cdot 100 / (3,1 \cdot 10^{-3}) = \\ &= 11,82 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}, \end{aligned}$$



где  $q = \pi(d_{\text{нар}}^2 - d_{\text{вн}}^2) / 4 = 3,14 \cdot (0,08^2 - 0,05^2) / 4 = 3,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  – сечение трубчатого шинопровода;

$$\sqrt{f / R_{100}} = \sqrt{50 / (11,82 \cdot 10^{-4})} = 205,7 \text{ Гц}^{1/2} / \text{Ом}^{1/2};$$

$$\delta = (d_{\text{нар}} - d_{\text{вн}}) / 2 = (0,08 - 0,05) / 2 = 0,015 \text{ м} \text{ – толщина стенки трубы;}$$

$$D = d_{\text{нар}}; \delta / D = 0,015 / 0,08 = 0,1875.$$

Коэффициент поверхностного эффекта  $k_{\text{п}} = 1,1$  (рис. П.2).

Для условия (в) задачи

$$R_{100} = \rho_0(1 + \alpha_{\theta}\theta)l / q =$$

$$= 2,62 \cdot 10^{-8}(1 + 0,0042 \cdot 95) \cdot 100 / (7,253 \cdot 10^{-4}) =$$

$$= 50,54 \cdot 10^{-4} \text{ Ом},$$

где  $q = \pi(d_{\text{нар}}^2 - d_{\text{вн}}^2) / 4 = 3,14 \cdot (0,08^2 - 0,074^2) / 4 = 7,253 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  – сечение трубчатого шинопровода;

$$\sqrt{f / R_{100}} = \sqrt{50 / (50,54 \cdot 10^{-4})} = 99,5 \text{ Гц}^{1/2} / \text{Ом}^{1/2};$$

$$\delta = (d_{\text{нар}} - d_{\text{вн}}) / 2 = (0,08 - 0,074) / 2 = 0,003 \text{ м} \text{ – толщина стенки трубы;}$$

$$D = d_{\text{нар}}; \delta / D = 0,003 / 0,08 = 0,0375.$$

Коэффициент поверхностного эффекта  $k_{\text{п}} = 1,02$  (рис. П.2).

Ответ: а)  $k_{\text{п}} = 1,75$ ; б)  $k_{\text{п}} = 1,1$ ; в)  $k_{\text{п}} = 1,02$ .

**Пример 2.** Определить мощность потерь в магнитопроводе, выполненном из трансформаторной листовой стали марки 1511 с толщиной листа  $\Delta = 0,35 \text{ мм}$ , если по катушке, имеющей число витков  $w = 1250$ , протекает переменный ток  $I = 0,6 \text{ А}$  частотой  $f = 50 \text{ Гц}$ . Размеры магнитопровода приведены на рис. 20.

*Решение.* Определим массу стали магнитопровода с учетом коэффициента заполнения поперечного сечения сталью  $k_3 = 0,9$ :

$$M = k_3 \gamma V = 0,9 \cdot 7800 \cdot 35 \cdot 35 \cdot 280 \cdot 10^{-9} = 2,41 \text{ кг},$$

где  $\gamma = 7800 \text{ кг/м}^3$  – плотность стали (табл. П.4);  $V$  – объем стали.

Напряженность магнитного поля

$$H = Iw / l_{\text{ср}} = 0,6 \cdot 1250 / (280 \cdot 10^{-3}) = 2700 \text{ А/м},$$

где  $l_{\text{ср}} = 280 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  – средняя длина магнитной силовой линии (рис. 20).

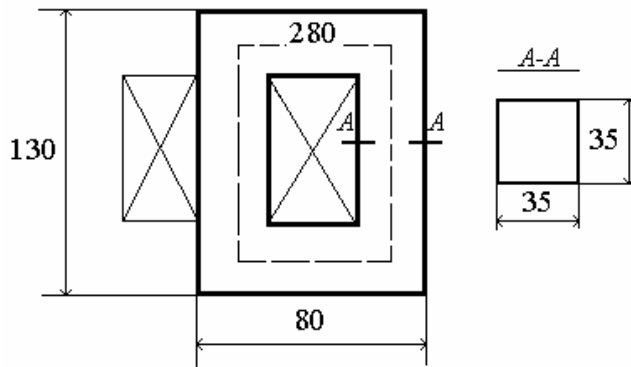


Рис. 20. Эскиз магнитопровода с катушкой

Значение индукции  $B = 1,46$  Тл для  $H = 2700$  А/м; удельные тепловые потери  $p_{уд} = 3$  Вт/кг (табл. П.4).

Потери в сердечнике

$$P = p_{уд} M = 3 \cdot 2,41 = 7,2 \text{ Вт.}$$

Ответ:  $P = 7,2$  Вт.

**Пример 3.** Рассчитать значение установившейся температуры медного круглого окрашенного краской проводника диаметром  $d = 25$  мм, по которому протекает постоянный ток  $I = 1000$  А. Температура окружающего воздуха  $\theta_0 = 35$  °С.

*Решение.* Исходным уравнением для решения задачи является уравнение (41):

$$P = I^2 R = I^2 \cdot \rho_0 (1 + \alpha_\theta \theta) l / q = k_{то} S (\theta - \theta_0).$$

Коэффициент теплоотдачи (табл. 6)

$$k_{то} = k_1 \cdot 10 \cdot [1 + k_2 \cdot 10^{-2} \cdot (\theta - \theta_0)], \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)},$$

где  $k_1 = 1,17$  Вт/(м<sup>2</sup> · °С);  $k_2 = 1,0$  1/°С.

Принимаем расчетную длину шины равной 1 метру и подставляем числовые значения в исходное уравнение:

$$\begin{aligned} & 1000^2 \cdot 1,62 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0043\theta) l / (3,14 \cdot 25^2 \cdot 10^{-6} / 4) = \\ & = 1,17 \cdot 10 [1 + 10^{-2} (\theta - 35)] \cdot 3,14 \cdot 25 \cdot 10^{-3} \cdot (\theta - 35). \end{aligned}$$

Решая последнее (квадратное) уравнение, находим  $\theta = 70$  °С.

Ответ:  $\theta = 70$  °С.

**Пример 4.** Определить длительно допустимую величину плотности переменного тока частотой 50 Гц катушки электромагнита. Катушка намотана медным круглым проводом, диаметр которого  $d = 4$  мм; изо-

ляция хлопчатобумажная, без пропитки. Число витков катушки  $w = 250$ , высота катушки  $H = 170$  мм, внутренний и наружный диаметры катушки  $D_{\text{вн}} = 100$  мм и  $D_{\text{нар}} = 155$  мм соответственно (рис. 21). Катушка находится в спокойном воздухе при  $\theta_0 = 35$  °С.

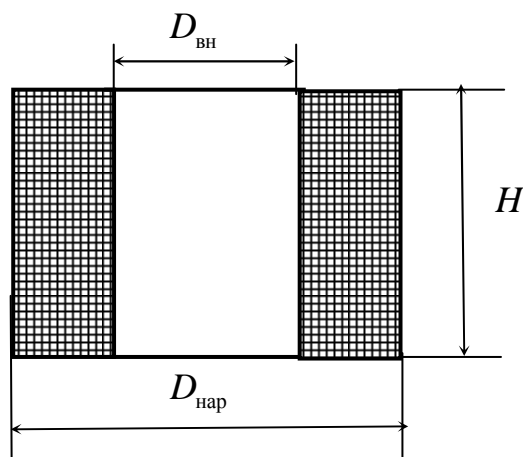


Рис. 21. Эскиз катушки

*Решение.* Для решения задачи воспользуемся формулами Ньютона  $P = k_{\text{то}} S (\theta - \theta_0)$ , расчета мощности потерь –  $P = I^2 R$ , сопротивления на переменном токе –  $R_{\sim} = k_{\text{п}} R_{\text{=}}$  и сопротивления на постоянном токе –  $R_{\text{=}} = \rho l / q$ .

Коэффициент теплоотдачи для цилиндрических катушек при площади поверхности охлаждения  $100 < S < 5000$  см<sup>2</sup> [2]

$$\begin{aligned} k_{\text{то}} &\approx 2,3 \cdot 10^{-3} [1 + 0,005(\theta - \theta_0)] / \sqrt[5]{S} = \\ &= 2,3 \cdot 10^{-3} [1 + 0,005(90 - 35)] / \sqrt[5]{1580} = \\ &= 0,67 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/(см}^2 \cdot \text{град)}, \end{aligned}$$

где площадь поверхности охлаждения

$$\begin{aligned} S &= 2 \left( \frac{\pi D_{\text{нар}}^2}{4} - \frac{\pi D_{\text{вн}}^2}{4} \right) + \pi (D_{\text{нар}} + D_{\text{вн}}) H = \\ &= 2 \left( \frac{3,14 \cdot 15,5^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 10^2}{4} \right) + 3,14 \cdot (15,5 + 10) \cdot 17 = \\ &= 1580 \text{ см}^2, \end{aligned}$$

допустимая температура для данного класса изоляции  $\theta_{\text{доп}} = 90$  °С (табл. П.2).

Допустимый длительный ток определяется из равенства выделяемой и отводимой с поверхности мощности потерь  $P = k_{\text{то}} S(\theta - \theta_0) = I^2 R$ :

$$I = \sqrt{\frac{k_{\text{то}} S(\theta - \theta_0)}{R}} = \sqrt{\frac{0,67 \cdot 10^{-3} \cdot 1580 \cdot (90 - 35)}{0,179}} = 18 \text{ А.}$$

Здесь активное сопротивление

$$R = k_{\text{доб}} R_{\text{н}} = k_{\text{доб}} \rho_0 (1 + \alpha_{\theta} \theta) l / q = \\ = 1 \cdot 1,62 \cdot 10^{-6} (1 + 0,0043 \cdot 90) \cdot 10000 / 0,1256 = 0,179 \text{ Ом,}$$

где  $\rho_0 = 1,62 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}$  – удельное сопротивление проводника при  $0^\circ \text{C}$ ;  $\alpha_{\theta} = 0,0043 \text{ 1/град}$  – температурный коэффициент сопротивления;  $l = w l_{\text{ср}} = 250 \cdot 40 = 10000 \text{ см}$  – длина проводников катушки;  $l_{\text{ср}} = \pi(D_{\text{нар}} + D_{\text{вн}}) / 2 = \pi(15,5 + 10) / 2 = 40 \text{ см}$  – средняя длина витка катушки;  $q = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (4 \cdot 10^{-1})^2}{4} = 0,1256 \text{ см}^2$  – площадь поперечного сечения провода.

Допустимая плотность тока в катушке

$$j = \frac{I}{q} = \frac{18}{0,1256} = 143 \text{ А/см}^2.$$

Ответ:  $j = 143 \text{ А/см}^2$ .

**Пример 5.** Написать уравнение кривой нагрева круглого медного проводника диаметром  $d = 10 \text{ мм}$ , по которому протекает постоянный ток  $I = 400 \text{ А}$ , если коэффициент отдачи с поверхности проводника  $k_{\text{то}} = 10 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^\circ \text{C)}$ , температура окружающей среды, которой является спокойный воздух,  $\theta_0 = 35^\circ \text{C}$ . Значение удельного сопротивления меди за время нарастания температуры  $\rho = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

Решение. Уравнение кривой нагрева

$$\tau = \tau_y \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right),$$

где  $\tau_y = P / (k_{\text{то}} \cdot S) = I^2 \rho l / (q \cdot k_{\text{то}} \cdot S)$  – установившееся превышение температуры.

Расчет проведем для проводника длиной  $l = 1$  м :

$$\tau_y = 400^2 \cdot 1,75 \cdot 10^{-8} \cdot 1 / \\ / (3,14 \cdot 5^2 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 1) = 114 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Постоянная времени нагрева

$$T = C / (k_{\text{то}} S) = cM / (k_{\text{то}} S) = \\ = 390 \cdot 8700 \cdot 3,14 \cdot 5^2 \cdot 10^{-6} / (10 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 1) = 850 \text{ с}.$$

Здесь  $c$  – удельная теплоемкость меди;  $M = \gamma V$  – масса проводника длиной в 1 м;  $\gamma$  – плотность меди;  $V$  – объем проводника.

Уравнение кривой нагрева

$$\tau = 114 \left( 1 - e^{-\frac{t}{850}} \right).$$

Ответ:  $\tau = 114 \left( 1 - e^{-\frac{t}{850}} \right).$

**Пример 6.** Определить допустимое число включений  $n$  в час катушки постоянного тока в повторно-кратковременном режиме нагрева, если время работы катушки  $t_{\text{раб}} = 150$  с и по ней протекает допустимый ток повторно-кратковременного режима работы  $I_{\text{п.кр}} = 12$  А.

Цилиндрическая катушка, намотана круглым проводником, диаметр которого  $d = 2$  мм, число витков катушки  $w = 500$ , внутренний диаметр катушки  $D_{\text{вн}} = 70$  мм, наружный диаметр катушки  $D_{\text{нар}} = 140$  мм, высота катушки равна  $H = 70$  мм. Катушка находится в спокойном воздухе, температура которого  $\theta_0 = 35$  °С. Коэффициент теплоотдачи  $k_{\text{то}} = 20$  Вт/(м<sup>2</sup> · °С). Изоляция проводника – хлопчатобумажная, без пропитки.

*Решение.* Длительно допустимая величина тока определяется из равенства

$$\frac{I_{\text{дл}}^2 \cdot \rho_0 (1 + \alpha \cdot \theta_{\text{доп}}) \cdot w \cdot \pi \cdot D_{\text{ср}}}{(\pi \cdot d^2 / 4)} = k_{\text{то}} (\theta_{\text{доп}} - \theta_0) S.$$

Для хлопчатобумажной изоляции допустимая температура  $\theta_{\text{доп}} = 90$  °С.

Ток длительного режима

$$I_{\text{дл}} = \sqrt{\frac{k_{\text{то}}(\theta_{\text{доп}} - \theta_o)S \cdot \pi \cdot d^2}{\rho_0(1 + \alpha \cdot \theta_{\text{доп}}) \cdot w \cdot \pi \cdot D_{\text{ср}} \cdot 4}} =$$

$$= \sqrt{\frac{20(90 - 35) \cdot 0,069 \cdot 3,14 \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2}{1,62 \cdot 10^{-8}(1 + 0,0043 \cdot 90)500 \cdot 3,14 \cdot 0,105 \cdot 4}} = 8 \text{ А},$$

где средний диаметр катушки

$$D_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{вн}} + D_{\text{нар}}}{2} = \frac{0,07 + 0,14}{2} = 0,105 \text{ м},$$

площадь поверхности охлаждения

$$S = 2 \left( \frac{\pi D_{\text{нар}}^2}{4} - \frac{\pi D_{\text{вн}}^2}{4} \right) + \pi (D_{\text{нар}} + D_{\text{вн}}) H =$$

$$= 2 \left( \frac{3,14 \cdot 0,14^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 0,07^2}{4} \right) +$$

$$+ 3,14 \cdot (0,14 + 0,07) \cdot 0,07 = 0,068 \text{ м}^2.$$

Коэффициент перегрузки по току

$$k_I = I_{\text{пкр}} / I_{\text{дл}} = 12 / 8 = 1,5.$$

Постоянную времени нагрева катушки определим из условия, что способностью воспринимать теплоту обладают только токопроводящие элементы:

$$T = c\gamma(\pi d^2 / 4)w\pi D_{\text{ср}} / k_{\text{то}}S =$$

$$= 390 \cdot 8700 \cdot (3,14 \cdot 2^2 \cdot 10^{-6} / 4) \times$$

$$\times 500 \cdot 3,14 \cdot 0,105 / (20 \cdot 0,069) = 1273 \text{ с}.$$

Здесь  $c$  – удельная теплоемкость меди;  $\gamma$  – плотность меди.

Подставив в равенство

$$k_I = I_{\text{кр}} / I_{\text{дл}} = \sqrt{\left(1 - e^{-\frac{3600}{T \cdot n}}\right) / \left(1 - e^{-\frac{3600 \text{ ПВ}}{T \cdot n \cdot 100 \%}}\right)}$$

выражения для ПВ =  $\frac{t_p}{t_{\text{ц}}} 100 \%$  и  $n = 3600/t_{\text{ц}}$ , получим

$$k_I = \sqrt{\left(1 - e^{-\frac{t_{\text{ц}}}{T}}\right) / \left(1 - e^{-\frac{t_p}{T}}\right)}.$$

Из последнего уравнения определим время цикла

$$t_{\text{ц}} = -T \cdot \ln \left[ 1 - k_I^2 \left( 1 - e^{-\frac{t_p}{T}} \right) \right] =$$
$$= -1273 \cdot \ln \left[ 1 - 1,5^2 \left( 1 - e^{-\frac{150}{1273}} \right) \right] = 366 \text{ с.}$$

Допустимое число включений катушки в час

$$n = 3600/t_{\text{ц}} = 3600/366 = 9,8 \approx 9.$$

Ответ:  $n = 9$ .

## 2.4. Электродинамические силы

### 2.4.1. Понятие *электродинамические силы*

**Электродинамические силы** (электродинамические усилия ЭДУ) – это механические силы, возникающие в контуре с электрическим током или между несколькими контурами с токами.

Эти силы можно рассматривать как полезные, если использовать их для построения аппаратов (например: в электродинамических приводах, быстродействующих автоматических выключателях) и как вредные, приводящие к разрушению аппаратов при аварийных режимах (коротких замыканиях).

Электродинамические силы могут достигать больших величин в силовых аппаратах и при коротких замыканиях (до сотен килоньютон). Они определяют необходимую механическую прочность токоведущих и поддерживающих их элементов.

Электродинамическая сила зависит от значения тока, длины, конфигурации, взаимного расположения токоведущих элементов и от магнитных свойств окружающей среды.

### 2.4.2. Методы расчета электродинамических сил

Расчет электродинамических сил базируется на *уравнении Ампера* или *уравнении энергетического баланса*.

Первый метод удобно использовать, если известна индукция в любой точке проводника, для которого необходимо определить силу.

Полная сила  $F$ , действующая на проводник длиной  $l$ , определяется по закону Ампера [выражение (48)], а направление силы – по правилу левой руки:

$$F = \int_0^l B i \sin \beta dl, \quad (48)$$

где  $dl$  – элемент проводника с током;  $l$  – длина проводника;  $B$  – индукция магнитного поля, создаваемого другими проводниками;  $i$  – ток проводника;  $\sin \beta$  – угол между элементом проводника и вектором индукции.

При расчете электродинамических сил токоведущих контуров, выполненных в виде витков или катушек (дугогасительные обмотки контакторов, автоматов, обмотки трансформаторов тока, реакторов), используют энергетический метод и выражение

$$F = \partial W / \partial x, \quad (49)$$

где  $W$  – электромагнитная энергия;  $x$  – координата, в направлении которой действует определяемая сила (обобщенная координата).

Уравнение (49) выражено в частных производных, так как изменение магнитной энергии нужно находить при изменении лишь той координаты, которую стремится изменить определяемая электродинамическая сила. Например, при определении силы, разрывающей виток с током, обобщенной координатой является радиус витка; при определении силы между двумя витками с токами обобщенной координатой является расстояние между ними.

Для системы двух взаимосвязанных контуров электромагнитная энергия определяется как

$$W = L_1 i_1^2 / 2 + L_2 i_2^2 / 2 + M i_1 i_2,$$

где  $L_1, L_2$  – собственные индуктивности контуров;  $i_1, i_2$  – токи в контурах;  $M$  – взаимная индуктивность.

Соотношение (49) позволяет рассчитать как силы, действующие в изолированном контуре, так и силы, действующие между контурами.

Для определения сил внутри одного независимого контура пользуются уравнением  $F = \partial W / \partial x = \frac{1}{2} i^2 \frac{\partial L}{\partial x}$ . При расчете силы взаимодействия контуров принимается, что энергия изменяется только в результате изменения взаимного расположения контуров. При этом энергия, обусловленная собственной индуктивностью контура, считается неизменной, а сила взаимодействия между контурами равна

$$F = \partial W / \partial x = i_1 i_2 \frac{\partial M}{\partial x}.$$



Энергетический метод удобен для использования, если известна аналитическая зависимость индуктивности или взаимной индуктивности от геометрических размеров токоведущих контуров.

Из уравнения (49) следует, что положительному направлению электродинамической силы соответствует возрастание энергии системы контуров  $\partial W / \partial x > 0$ . Деформация контура или его перемещение происходит под действием силы таким образом, чтобы электромагнитная энергия системы возрастала.

### 2.4.3. ЭДУ между параллельными проводниками

Электродинамические силы между параллельными проводниками (рис. 22) можно рассчитать на основе выражения (48), так как в этом случае легко определить индукцию в любой точке пространства.

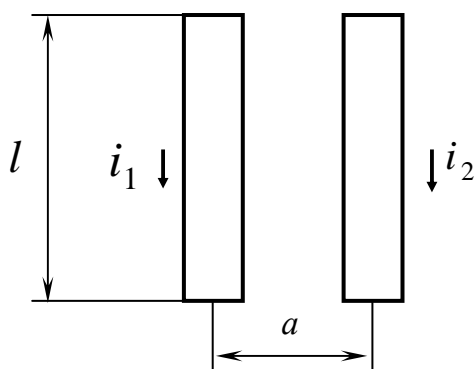


Рис. 22. Параллельные проводники одинаковой длины

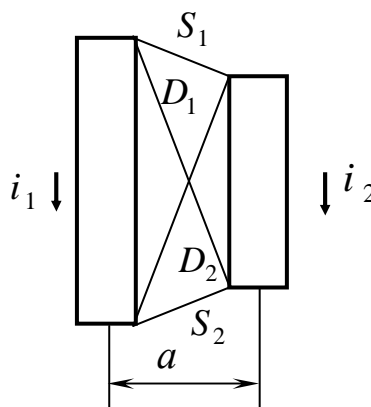


Рис. 23. Параллельные проводники разной длины

Если проводники бесконечно тонкие (ток сосредоточен в геометрической оси проводников), то электродинамическая сила, действующая на проводник, равна

$$F = [\mu_0 / (4\pi)] i_1 i_2 k_d = 10^{-7} i_1 i_2 k_d, \text{ Н}, \quad (50)$$

где  $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ , Гн/м, – магнитная проницаемость воздуха;

$k_d = \frac{2l}{a} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{a}{l} \right)^2} - \frac{a}{l} \right]$  – геометрический фактор (коэффициент контура электродинамических сил), зависящий только от размеров проводников и их расположения.

В случае бесконечно длинных проводников  $a / l \ll 1$  и  $k_d = 2l / a$ .

Для двух параллельных проводников разной длины (рис. 23) геометрический фактор рассчитывается по формуле

$$k_d = \frac{\sum D - \sum S}{a},$$

где  $\sum D$  – сумма диагоналей трапеции, построенной на взаимодействующих проводниках;  $\sum S$  – суммарная длина боковых сторон этой трапеции.

При расчете электродинамических сил должно быть учтено взаимное расположение проводников с токами, а также форма и размеры их сечений.

Для случая произвольного расположения проводников величина электродинамической силы может быть найдена по формуле (50). При этом значение геометрического фактора  $k_d$  определяется по таблицам, приведенным в литературе (табл. П.5).

Круглая и кольцевая формы сечения проводников не влияют на величину электродинамических сил, так как магнитные силовые линии вокруг проводников представляют в этом случае (как и в случае бесконечно тонких проводников) окружности, и можно считать, что ток сосредоточен в геометрической оси проводника. Это утверждение справедливо только при постоянном токе. Проявление эффекта близости при переменном токе в круглых проводниках может изменить значение электродинамической силы.

При прямоугольной форме сечения размеры проводника влияют на величину электродинамических сил, так как магнитные силовые линии являются овалами. Это влияние учитывается с помощью коэффициента формы  $k_\phi$ , который определяется аналитически либо по кривым, приведенным в справочной литературе (рис. П.4). Значение электродинамических сил находится как

$$F = 10^{-7} i_1 i_2 k_d k_\phi, \text{ Н.} \quad (51)$$

#### 2.4.4. ЭДУ витка, катушки, между витками и катушками

Электродинамические силы витка, катушки, между витками и между катушками рассчитываются по энергетической формуле.

Индуктивность *кругового витка с током* (рис. 24) при  $r / R \leq 0,25$  ( $r$  – радиус проводника,  $R$  – радиус витка)  $L = \mu_0 R \left( \ln \frac{8R}{r} - 1,75 \right)$ , Гн.

При протекании тока  $i$  возникает сила  $F_R$ , стремящаяся увеличить ра-

диус витка, так как с ростом  $R$  растет индуктивность  $L$  и электромагнитная энергия витка.

Электродинамическая сила, приложенная к окружности длиной  $2\pi R$ , определяется как

$$\begin{aligned} F_R &= \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dR} = (\mu_0 / 2) i^2 \left( \ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right) = \\ &= 2\pi i^2 10^{-7} \left( \ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right), \text{ Н.} \end{aligned} \quad (52)$$

Сила, разрывающая виток (сила в сечении витка), определяется по формуле

$$F_q = i^2 10^{-7} \left( \ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right), \text{ Н.} \quad (53)$$

Механические напряжения растяжения, возникающие в сечении витка от силы  $F_q$ , не должны превышать допустимых величин.

Если круговой виток находится в равномерном магнитном поле, создаваемом другими проводниками, то необходимо учитывать дополнительную силу, обусловленную взаимодействием тока витка с внешним полем.

*Для катушки*, имеющей  $w$  витков, индуктивность и сила возрастают пропорционально квадрату числа витков:

$$F_q = (iw)^2 10^{-7} \left( \ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right), \text{ Н.} \quad (54)$$

Проводники катушки обтекаются током одного направления, при этом возникают силы притяжения между отдельными витками. В результате катушка подвергается действию электродинамических сил, сжимающих ее по высоте и увеличивающих средний диаметр.

Если расстояние *между витками*  $h$  (рис. 25), соизмеримое с их диаметрами  $2R_1$  и  $2R_2$ , мало отличается от  $R_1$ , то взаимоиנדуктивность выражается формулой

$$M = \mu_0 R_1 \left( \ln \frac{8R_1}{\sqrt{h^2 + c^2}} - 2 \right), \text{ Гн,} \quad (55)$$

где  $c = R_2 - R_1$ .

Вертикальная составляющая электродинамической силы  $F_h$  витка определяется как

$$F_h = i_1 i_2 dM / dh = i_1 i_2 \frac{4\pi R_1 h}{h^2 + c^2} 10^{-7}, \text{ Н.} \quad (56)$$

Направление силы можно определить следующим образом: если потоки, создаваемые токами, направлены в одну сторону, то витки будут притягиваться (максимальное значение потокоцепления возникает при совпадении контуров), если в разные стороны – отталкиваться.

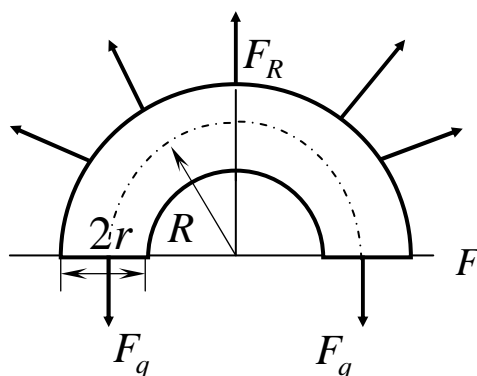


Рис. 24. ЭДУ кругового витка

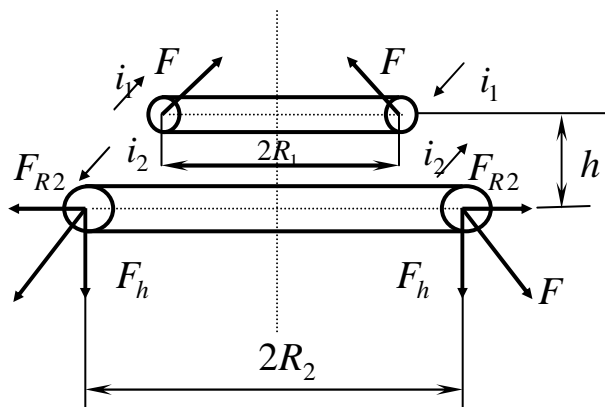


Рис. 25. ЭДУ между витками

Радиальная составляющая силы от собственного тока и от взаимодействия этого тока с продольной составляющей поля другого витка определяется как

$$F_R = \frac{dW}{dR} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dR} + i_1 i_2 \frac{dM}{dR}, \quad (57)$$

где  $R = R_1$  при определении силы первого витка и  $R = R_2$  при определении силы второго витка.

**Электродинамические силы между цилиндрическими катушками** определяются как

$$F = i_1 i_2 dM / dx, \quad (58)$$

где  $x$  – расстояние между катушками.

Производную  $dM / dx$  определяют с помощью семейства кривых Двайта или Хака в зависимости от величины  $h / D$  (отношения высоты к среднему диаметру катушки), рис. П.5.

## 2.4.5. ЭДУ на переменном токе

**Электродинамические силы при переменном токе** изменяются во времени, причем для однофазной цепи сила не меняется по знаку, а для трехфазной – меняется. Для расчета аппаратов важно знать максимальное значение этой силы. Расчет электродинамических сил, действующих на токоведущие части аппаратов на переменном токе, произво-

дится теми же методами и по тем же зависимостям, что и при постоянном токе.

Обобщенную зависимость силы от тока можно представить в виде формулы (51).

Для *однофазного переменного тока*  $i(t) = I_m \sin \omega t$  эта зависимость выглядит как

$$\begin{aligned} F &= 10^{-7} k_d k_\phi I_m^2 (\sin \omega t)^2 = \\ &= c I_m^2 \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} = \frac{F_m}{2} - \frac{F_m}{2} \cos 2\omega t, \end{aligned} \quad (59)$$

где  $c = 10^{-7} k_d k_\phi$ ;  $F_m = c I_m^2$  – максимальное значение силы.

Из выражения (59) видно, что сила имеет постоянную и переменную составляющие. Переменная составляющая меняется во времени с удвоенной частотой по сравнению с частотой переменного тока. Амплитуда переменной составляющей  $F_m$  равна по значению амплитуде постоянной составляющей.

Расчет электродинамических сил на переменном токе проводят по максимальному значению тока для наиболее тяжелого случая (короткое замыкание при наличии апериодической составляющей тока). При этом значение силы

$$F_{\max} = c k_{\text{уд}}^2 I_m^2. \quad (60)$$

Ударный коэффициент  $k_{\text{уд}}$  зависит от мощности установки, расположения аппарата и вида цепи. При расчетах обычно принимают  $k_{\text{уд}} = 1,8$ .

Для *трехфазной системы токов*, в которой токи сдвинуты на  $120^\circ$ , сила меняет знак и достигает в определенные моменты времени максимальных значений отталкивания и притягивания, причем максимальные значения отталкивающих и притягивающих сил равны и имеют место в средней фазе:

$$F = 0,87 c I_m^2. \quad (61)$$

С учетом апериодической составляющей максимальная электродинамическая сила, действующая на провод средней фазы, определяется как

$$F_{\max} = 0,87 c k_{\text{уд}}^2 I_m^2. \quad (62)$$

#### 2.4.6. Электродинамическая стойкость

**Электродинамической стойкостью** аппарата называют его способность противостоять без повреждений и нарушений функционального состояния механическим силам, возникающим при протекании токов.

Электродинамическая стойкость количественно характеризуется **током электродинамической стойкости** (наибольшим значением тока, который аппарат может выдержать во включенном состоянии без механических или электрических повреждений и без произвольного отключения). Ток электродинамической стойкости электрического аппарата должен быть больше ударного тока короткого замыкания для данных условий работы. Электродинамическая стойкость выражается либо амплитудным значением тока, при котором механические напряжения в элементах аппарата не выходят за пределы допустимых величин, либо кратностью тока относительно амплитуды номинального тока.

При оценке электродинамической стойкости необходимо учитывать степень защиты аппарата, так как для аппаратов открытого исполнения существуют дополнительные нагрузки от воздействия внешних факторов. В этом случае результирующая нагрузка на изоляторы и изоляционные детали берется в 3 раза меньше разрушающей, для аппаратов герметичного исполнения – в 1,5–1,7 раза. В случае когда частота переменной составляющей электродинамической силы близка к собственной частоте механических колебаний, даже при сравнительно небольших силах возможно разрушение аппарата вследствие явлений резонанса. Возможность резонанса стремятся исключить.

#### 2.4.7. Примеры решения задач

**Пример 1.** Определить электродинамическое усилие, действующее на 1 м длины прямолинейного бесконечно тонкого проводника, по которому протекает постоянный ток  $I = 10$  кА. Проводник находится в однородном постоянном магнитном поле, магнитная индукция в каждой точке проводника  $B = 0,1$  Тл, а угол между направлением тока и вектором индукции  $\beta = 30^\circ$ .

*Решение.* Действующее на проводник усилие определяется на основе закона Ампера [формула (48)]:

$$F = I l B \sin \beta = 10 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 0,1 \cdot 0,5 = 500 \text{ Н.}$$

*Ответ:*  $F = 500$  Н.

**Пример 2.** Определить величину электродинамического усилия, с которым притягиваются друг к другу два параллельных круглых, бес-

конечно длинных проводника, находящихся на расстоянии одного метра друг от друга ( $a = 1$  м). Токи в проводниках равны 10 и 20 кА.

*Решение.* Электродинамическое усилие, действующее между параллельными проводниками, определим по формуле (50):

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 k_d = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{4\pi} 10 \cdot 10^3 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 2 = 40 \text{ Н},$$

где  $k_d = 2l / a = 2 \cdot 1 / 1 = 2$  – коэффициент электродинамических сил для бесконечно длинных проводников.

*Ответ:*  $F = 40$  Н.

**Пример 3.** Определить электродинамическое усилие, действующее между параллельно расположенными шинами (рис. 23), если  $I_1 = 10$  кА,  $I_2 = 15$  кА,  $l_1 = 1$  м,  $l_2 = 1,5$  м,  $a = 0,5$  м.

*Решение.* Электродинамическое усилие, действующее между параллельными проводниками, определим по выражению (50)

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 k_d = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{4\pi} 10 \cdot 10^3 \cdot 15 \cdot 10^3 \cdot 3,14 = 47,1 \text{ Н},$$

где  $k_d = \frac{\sum D - \sum S}{a} = \frac{2,69 - 1,12}{0,5} = 3,14$  – коэффициент электродинамических сил для двух параллельных проводников разной длины.

*Ответ:*  $F = 47,1$  Н.

**Пример 4.** Определить усилие, разрывающее проводник с током  $I = 100$  кА в месте, где проводник изменяет свое поперечное сечение от  $D = 50$  мм до  $d = 20$  мм.

*Решение.* Электродинамическое усилие в проводниках при изменении поперечного сечения (усилие Дуайта)

$$F_D = \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 \ln \frac{D}{d} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{4\pi} (100 \cdot 10^3)^2 \ln \frac{50 \cdot 10^{-3}}{20 \cdot 10^{-3}} = 916,3 \text{ Н},$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость вакуума.

*Ответ:*  $F_D = 916,3$  Н.

**Пример 5.** Определить электродинамическое усилие, возникающее между двумя витками цилиндрического однослойного реактора, имеющего радиус витка  $R = 1$  м. Витки имеют шаг  $h = 10$  мм. По реактору протекает ток короткого замыкания  $I = 50$  кА.

*Решение.* Для решения воспользуемся формулой (56):

$$\begin{aligned} F_h &= i_1 i_2 dM / dh = i_1 i_2 \frac{4\pi R_1 h}{h^2 + c^2} 10^{-7} = \\ &= I^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot R / h = (50 \cdot 10^3)^2 \times \\ &\times 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 / (10 \cdot 10^{-3}) = 314000 \text{ Н.} \end{aligned}$$

*Ответ:*  $F_h = 314000 \text{ Н.}$

**Пример 6.** Определить: 1) электродинамическую силу, возникающую между двумя витками цилиндрического однослойного реактора, имеющего радиус  $R = 1 \text{ м}$ ; 2) силу в витках реактора и 3) силу, разрывающую виток, изготовленный из круглого провода радиусом  $r = 10 \text{ мм}$ . Шаг витков реактора  $h = 20 \text{ мм}$ . По реактору протекает ток короткого замыкания  $I_{кз} = 50 \text{ кА}$ .

*Решение.* Для решения задачи можно воспользоваться формулами энергетического баланса  $F = \partial W / \partial x$ , определения энергии

$$W = L_1 i_1^2 / 2 + L_2 i_2^2 / 2 + M i_1 i_2, \text{ взаимной индуктивности } M = \mu_0 R \left( \ln \frac{8R}{h} - 2 \right)$$

$$\text{и индуктивности } L = \mu_0 R \left( \ln \frac{8R}{r} - 1,75 \right).$$

Электродинамическая сила, действующая между витками реактора, определяется по формуле

$$F_h = \partial W / \partial x = dW / dh = i_1 i_2 dM / dh = I^2 |dM / dh|.$$

Тогда

$$F_h = I^2 \mu_0 R / h = (50 \cdot 10^3)^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 / (20 \cdot 10^{-3}) = 157000 \text{ Н.}$$

Электродинамическая сила в витке, обусловленная собственной индуктивностью, определяется по формуле

$$\begin{aligned} F'_R &= \frac{dW}{dR} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dR} = (1/2) I^2 \mu_0 \left( \ln \frac{8R}{r} - 0,75 \right) = \\ &= \frac{1}{2} \cdot (50 \cdot 10^3)^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \left( \ln \frac{8 \cdot 1}{10 \cdot 10^{-3}} - 0,75 \right) = 9317 \text{ Н.} \end{aligned}$$

Электродинамическая сила в витке, обусловленная взаимодействием тока витка с продольной составляющей тока другого витка, определяется по формуле



$$F_R'' = \frac{dW}{dR} = i_1 i_2 \frac{dM}{dR} = I^2 \mu_0 \left( \ln \frac{8R}{h} - 1 \right) =$$

$$= (50 \cdot 10^3)^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \left( \ln \frac{8 \cdot 1}{20 \cdot 10^{-3}} - 1 \right) = 15673 \text{ Н.}$$

Сила в витке реактора

$$F_R = F_R' + F_R'' = 9317 + 15673 = 24990 \text{ Н.}$$

Эта сила равномерно распределена по дуге окружности витка.

Сила, разрывающая виток,

$$F_q = \frac{F_R}{2\pi} = \frac{24990}{2 \cdot 3,14} = 3979 \text{ Н.}$$

Ответ:  $F_h = 157000 \text{ Н}$ ;  $F_R = 24990 \text{ Н}$ ;  $F_q = 3979 \text{ Н}$ .

**Пример 7.** Проверить, удовлетворяют ли условиям прочности и жесткости ножи трехполюсного разъединителя (рис. 26), по которым протекает предельный ток трехфазного короткого замыкания. Амплитуда установившегося тока короткого замыкания  $I_{кз} = 50 \text{ кА}$ , частота тока  $f = 50 \text{ Гц}$ .

Ножи разъединителя выполнены из меди, поперечное сечение их имеет прямоугольную форму с размерами  $h \times b = 100 \times 10 \text{ мм}$ . Ножи расположены широкими сторонами друг к другу, жестко закреплены в нижней части разъединителя и свободно опираются в верхней части. Длина ножей  $l = 600 \text{ мм}$ , расстояние между ними  $a = 300 \text{ мм}$ .

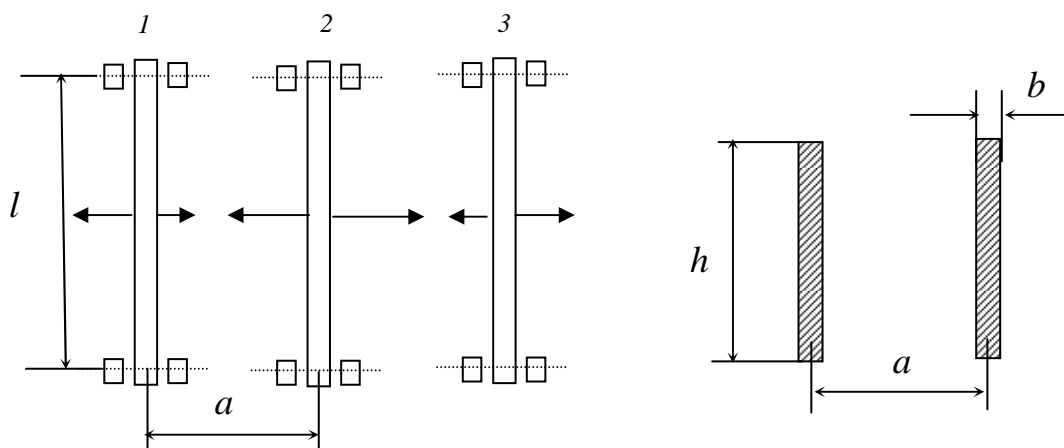


Рис. 26. Эскиз разъединителя

*Решение.* С электрической точки зрения ножи разъединителя представляют собой токоведущие прямолинейные проводники, с механической точки зрения – балку на двух опорах.

Максимальная сила возникает в средней фазе. При наличии апериодической составляющей тока эта сила определяется по формуле

$$F = 10^{-7} k_d k_\phi 0,87 k_{уд}^2 I_m^2 = \\ = 10^{-7} \cdot 2,47 \cdot 1 \cdot 0,87 \cdot 1,8^2 \cdot (50 \cdot 10^3)^2 = 1741 \text{ Н},$$

где  $k_d = \frac{2l}{a} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{a}{l} \right)^2} - \frac{a}{l} \right] = \frac{2 \cdot 0,6}{0,3} \cdot \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{0,3}{0,6} \right)^2} - \frac{0,3}{0,6} \right] = 2,47$  – геометрический фактор,  $k_\phi \approx 1$  при  $\frac{a-b}{b+h} = \frac{0,3-0,01}{0,01+0,1} = 2,64 \geq 2$ .

Нож разъединителя можно рассчитать как балку на двух опорах, при этом напряжение на изгиб

$$\sigma_{из} = \frac{M}{W_{из}} = \frac{130,6}{1,67 \cdot 10^{-6}} = 78,2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2,$$

где  $M = \frac{Fl}{8} = \frac{1741 \cdot 0,6}{8} = 130,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$  – максимальное значение изгибающего момента;

$W_{из} = \frac{hb^2}{6} = \frac{0,1 \cdot 0,01^2}{6} = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$  – момент сопротивления.

Напряжение на изгиб меньше допустимого напряжения для меди ( $\sigma_{из} = 78,2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2 \leq \sigma_{доп} = 137 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ ), следовательно, ножи рубильника удовлетворяют условиям прочности.

Во избежание появления механического резонанса необходимо, чтобы частота собственных колебаний механической системы не была равна частоте силы.

Для параллельных шин частота собственных колебаний

$$f_{соб} = \frac{k}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{\gamma S}} = \frac{4,8}{0,6^2} \sqrt{\frac{10,8 \cdot 10^{10} \cdot 0,08 \cdot 10^{-7}}{85,3 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3}}} = 42,43 \text{ Гц},$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий жесткость заделки ножа. При жестко заделанном одном конце и свободном закреплении другого конца

$k = 4,8$ ;  $E = 10,8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$  – модуль упругости меди;

$\gamma = 85,3 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^3$  – удельный вес меди;  $S = hb = 0,1 \cdot 0,01 = 10^{-3} \text{ м}^2$  –

площадь поперечного сечения;  $J = \frac{hb^3}{12} = \frac{0,1 \cdot 0,01^3}{12} = 0,08 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$  –

момент инерции поперечного сечения.

Так как собственная частота меньше вынужденной ( $f_{\text{соб}} = 42,43 \text{ Гц} < f_{\text{д}} = 100 \text{ Гц}$ ), механический резонанс не будет иметь места, а ножи удовлетворяют условиям жесткости.

*Ответ:* Ножи разъединителя удовлетворяют условиям прочности и жесткости.

## **2.5. Магнитные цепи электрических аппаратов**

### **2.5.1. Понятие *магнитная цепь***

**Магнитные цепи** находят широкое применение в различных электрических аппаратах (электромагнитных устройствах, контакторах, автоматах, приводах выключателей, тормозных, тяговых, подъемных электромагнитах, реле, датчиках, электромагнитных муфтах, дросселях и др.).

Под магнитной цепью понимается совокупность тел и сред, создающая ориентированный магнитный поток при наличии магнитодвижущей силы.

Магнитные цепи можно разбить на два основных вида: цепи с малым потоком рассеяния и цепи с большим потоком рассеяния.

С достаточной для практики точностью потоком рассеяния можно пренебречь в трех случаях: когда магнитопровод замкнут; когда на пути основного потока имеется воздушный зазор сравнительно малой величины, а магнитная цепь насыщена незначительно; когда размагничивающее действие вторичной обмотки сравнительно невелико. Иначе говоря, пренебрегать потоком рассеяния можно в тех случаях, когда он мал по сравнению с основным потоком.

### **2.5.2. Методы расчета магнитных цепей**

**Методы расчета магнитных цепей** основываются на законах Ома и Кирхгофа применительно к магнитным цепям. При этом используются аналитические и графоаналитические методы. Основные трудности расчета магнитных цепей связаны с учетом нелинейной магнитной характеристики, потерь в стали и размагничивающего действия магнитных экранов.

При расчете магнитной цепи определяется МДС обмотки, необходимая для создания заданного рабочего потока (прямая задача), или рабочий поток по известной МДС (обратная задача).

Эти задачи решаются с помощью уравнений Кирхгофа для магнитной цепи. Согласно первому закону Кирхгофа алгебраическая сумма потоков в любом узле магнитной цепи равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n \Phi_k = 0. \quad (63)$$

Второй закон Кирхгофа следует из известного закона полного тока. Падение магнитного потенциала по замкнутому контуру равно сумме МДС, действующих в этом контуре:

$$\oint Hdl = \sum iw = \sum F_j, \quad (64)$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля;  $dl$  – элементарный участок контура интегрирования;  $\sum iw = \sum F_j$  – алгебраическая сумма МДС, действующих в контуре;  $w$  – число витков обмотки.

Расчет магнитных цепей подобен расчету электрических цепей и основан на применении уравнений (63)–(64). Так как индукция  $B = \mu_0 \mu_r H$  ( $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость воздуха;  $\mu_r$  – относительная магнитная проницаемость), можно записать, что

$$\oint \frac{BSdl}{\mu_r \mu_0 S} = \sum iw, \quad (65)$$

где  $S$  – сечение данного участка магнитной цепи.

Выражение  $dl / (\mu_r \mu_0 S)$  аналогично выражению для активного сопротивления элемента электрической цепи. Выражение (65) можно представить в виде

$$\oint \Phi dR_m = \sum iw, \quad (66)$$

где  $dR_m$  – магнитное сопротивление участка длиной  $dl$ .

Когда поток в отдельных участках магнитной цепи не меняется, интеграл в уравнении (66) можно заменить суммой

$$\sum_{j=1}^n \Phi_j R_{mj} = \sum F_j. \quad (67)$$

Направление МДС, совпадающее с направлением обхода контура, принимается за положительное.

Из выражения (67) вытекает закон Ома для магнитной цепи, при этом вместо тока подставляется магнитный поток, вместо электрического сопротивления – магнитное, вместо электродвижущей силы – магнитодвижущая (МДС).

По аналогии с электрическим сопротивлением магнитное можно представить как

$$R_m = \frac{1}{\mu_r \mu_0} \frac{l}{S} = \rho_m \frac{l}{S}, \quad (68)$$

где  $\rho_m$  – магнитное сопротивление единицы длины магнитной цепи при сечении, равном единице, м/Гн.

Для расчета по формуле (68) необходимо знать  $\rho_m$ . Если задана не кривая  $\rho_m(B)$ , а кривая намагничивания материала  $B(H)$ , для расчета удобно использовать выражение (64). Если на отдельных участках магнитной цепи индукция постоянна, то интеграл в уравнении (64) можно заменить суммой

$$\sum_{j=1}^n H_j l_j = \sum_{j=1}^n F_j. \quad (69)$$

По известной индукции в каждом участке с помощью кривой намагничивания находят напряженность  $H_j$ , после чего с помощью выражения (69) можно отыскать МДС обмотки.

При расчете магнитной цепи часто более удобной является величина, обратная магнитному сопротивлению, – магнитная проводимость, Гн:

$$\Lambda = 1 / R_m = \mu_r \mu_0 S / l. \quad (70)$$

Уравнение (67) при этом принимает вид

$$\sum_{j=1}^n \Phi_j \frac{1}{\Lambda_j} = \sum F_j. \quad (71)$$

Магнитное сопротивление и проводимость ферромагнитных материалов являются сложной нелинейной функцией индукции, что затрудняет решение как прямой, так и обратной задачи.

Магнитная проницаемость воздушного зазора является постоянной величиной. Для сравнительно простых форм полюсов проводимости воздушных зазоров могут быть вычислены аналитически. Например, для полюсов при малом воздушном зазоре  $\delta$  поле можно считать равномерным, а проводимость определить по формуле

$$\Lambda_\delta = \mu_0 \frac{S}{\delta}. \quad (72)$$

Для сравнительно больших зазоров необходимо учитывать выпучивание. Расчет в этом случае для полюсов простых форм проводят по эмпирическим формулам (табл. П.6). Для полюсов более сложных форм аналитические выражения отсутствуют, и проводимости могут быть рас-

считаны графическими методами (построение картины поля), методом вероятных путей потока (разбивки области поля на простейшие геометрические фигуры, для которых известны аналитические выражения).

При переменном напряжении ток в обмотке определяется в основном ее индуктивным сопротивлением, которое меняется при перемещении якоря. Магнитное сопротивление магнитопровода на переменном токе зависит не только от  $\mu_r, l, S$ , но и от потерь в стали и наличия короткозамкнутых витков. Потери в стали в схеме замещения магнитной цепи переменного тока учитываются с помощью реактивного магнитного сопротивления  $X_m$ .

Расчет магнитной цепи переменного тока ведется с помощью законов Кирхгофа в комплексной форме методом последовательных приближений. При расчете принимается синусоидальное изменение напряжения, тока и потока. Если же магнитная цепь работает при сравнительно больших индукциях (за коленом кривой намагничивания), то расчет ведется по первой гармонике.

### 2.5.3. Материалы магнитных цепей

Для магнитных цепей электрических аппаратов применяются самые разнообразные **магнитомягкие материалы**, от правильного выбора которых во многом зависит качество конструкции электрического аппарата в целом. Кроме определенных магнитных свойств, материал должен удовлетворять необходимым механическим и электрическим параметрам. Выбор материала должен быть экономически оправдан.

К магнитным материалам предъявляются следующие требования: высокая магнитная проницаемость, высокая индукция насыщения, малая коэрцитивная сила (Н), малые удельные потери, стабильность магнитных характеристик, технологичность, низкая стоимость.

Высокая магнитная проницаемость позволяет снизить МДС обмотки, мощность, необходимую для срабатывания электромагнита, а также уменьшить его габариты. Важным параметром является индукция насыщения. Тяговое усилие электромагнита пропорционально квадрату индукции. Поэтому чем выше индукция насыщения, тем больше тяговое усилие. После отключения обмотки электромагнита в магнитной системе существует остаточный магнитный поток, который определяется коэрцитивной силой материала магнитопровода и проводимостью рабочего зазора. Остаточный магнитный поток может привести к залипанию якоря. Во избежание этого требуется, чтобы материал магнитопровода обладал низкой коэрцитивной силой (малой шириной петли гистерезиса). Материалы для электромагнитов переменного тока должны иметь

малые потери на вихревые токи и гистерезис. Магнитные характеристики материалов не должны зависеть от температуры, механических воздействий и т.д.

#### 2.5.4. Примеры решения задач

**Пример 1.** Определить суммарную магнитную проводимость рабочих зазоров между якорем и полюсами электромагнитного механизма, представленного на рис. 27.

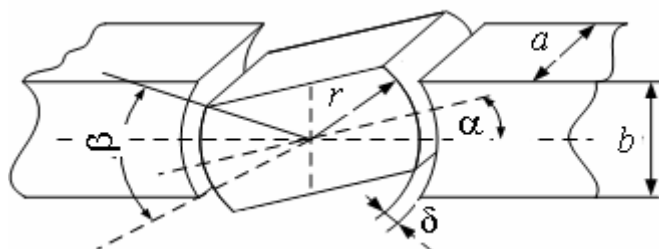


Рис. 27. Полюса электромагнитного механизма

Размеры полюсов:  $a = 2 \cdot 10^{-2}$  м,  $b = 2 \cdot 10^{-2}$  м,  $r = 2 \cdot 10^{-2}$  м,  $\delta = 0,06 \cdot 10^{-2}$  м,  $\alpha = 15^\circ$ .

*Решение.* Для концентрических полюсов с постоянными значениями зазора, толщины, ширины и радиуса проводимость без учета потока выпучивания определяется по формуле (табл. П.6)

$$\begin{aligned} \Lambda_\delta &= \mu_0 a \beta / \ln(1 + \delta / r) = \\ &= 4\pi 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,785 / \ln[1 + 0,06 \cdot 10^{-2} / (2 \cdot 10^{-2})] = \\ &= 66,75 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}, \end{aligned}$$

где  $\alpha$  – угол сдвига между осью полюсов и осью якоря;  $\beta = 2 \arcsin(b / 2r) - \alpha = 2 \arcsin[2 \cdot 10^{-2} / (2 \cdot 2 \cdot 10^{-2})] - 15 = 45^\circ = 0,785$  рад – угол перекрытия.

*Ответ:*  $\Lambda_\delta = 66,75 \cdot 10^{-8}$  Гн.

**Пример 2.** Определить суммарную магнитную проводимость рабочих зазоров и удельную проводимость рассеяния прямоходового электромагнита (рис. 28).

Геометрические размеры электромагнита:  $\delta = 0,1 \cdot 10^{-2}$  м,  $d_{\text{пн}} = 2,4 \cdot 10^{-2}$  м,  $h_{\text{пн}} = 0,3 \cdot 10^{-2}$  м,  $h = 3,6 \cdot 10^{-2}$  м,  $d_c = 1,6 \cdot 10^{-2}$  м.

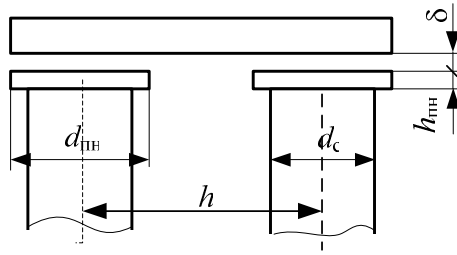


Рис. 28. Полюса прямоходового электромагнита с внешним якорем

*Решение.* Магнитная проводимость одного рабочего зазора определяется по формуле (табл. П.6)

$$\begin{aligned}\Lambda_{\delta} &= \mu_0 \left( \frac{\pi d^2}{4\delta} + 0,58d + \frac{xd}{0,22\delta + 0,4x} \right) = \\ &= 4\pi 10^{-7} [\pi \cdot (2,4 \cdot 10^{-2})^2 / (4 \cdot 0,1 \cdot 10^{-2}) + \\ &+ 0,58 \cdot 2,4 \cdot 10^{-2} + 0,3 \cdot 10^{-2} \cdot 2,4 \cdot 10^{-2} / \\ &/ (0,22 \cdot 0,1 \cdot 10^{-2} + 0,4 \cdot 0,3 \cdot 10^{-2})] = 65 \cdot 10^{-8} \text{ Гн},\end{aligned}$$

где  $d = d_{\text{пн}}$ ;  $x = h_{\text{пн}}$ .

Суммарная проводимость

$$\Lambda_{\delta\Sigma} = \Lambda_{\delta} / 2 = 65 \cdot 10^{-8} / 2 = 32,5 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}.$$

Удельная проводимость рассеяния (табл. П.6)

$$\begin{aligned}\lambda_{\sigma} &= \mu_0 \frac{\pi}{\ln(n + \sqrt{n^2 - 1})} = \\ &= 4\pi 10^{-7} \frac{3,14}{\ln(2,25 + \sqrt{2,25^2 - 1})} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м},\end{aligned}$$

где  $n = h / d_c = 3,6 \cdot 10^{-2} / 1,6 \cdot 10^{-2} = 2,25$ .

*Ответ:*  $\Lambda_{\delta} = 65 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}$ ;  $\Lambda_{\delta\Sigma} = 32,5 \cdot 10^{-8} \text{ Гн}$ ;  $\lambda_{\sigma} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$ .

**Пример 3.** Определить величину тока возбуждения для создания индукции в тороиде  $B = 1,2 \text{ Тл}$  и найти потери в стали.

Внутренний диаметр тороида  $d = 10 \text{ см}$ , радиальная ширина  $a = 0,8 \text{ см}$ , толщина пакета тороида  $b = 1,5 \text{ см}$ , марка стали – 1511, толщина листов  $\Delta = 0,5 \text{ мм}$ , коэффициент заполнения стали  $k_c = 0,95$ , число витков обмотки  $w = 1000$ , частота переменного тока  $f = 50 \text{ Гц}$ .

*Решение.* Активное сечение магнитопровода

$$S = abk_c = 0,8 \cdot 10^{-2} \cdot 1,5 \cdot 10^{-2} \cdot 0,95 = 1,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$



Величина магнитного потока

$$\Phi = BS = 1,2 \cdot 1,14 \cdot 10^{-4} = 13,7 \cdot 10^{-5} \text{ Вб.}$$

По индукции из кривых (рис. П.6) находим  $\rho_R = 3,2 \cdot 10^4 \text{ см/Гн}$  и  $\rho_X = 1 \cdot 10^4 \text{ см/Гн}$ .

Тогда магнитные сопротивления тороида

$$R_m = \rho_R \frac{\pi(d+a)}{S} = 3,2 \cdot 10^4 \frac{3,14(10+0,8)}{1,14} = 95,2 \cdot 10^4 \text{ 1/Гн};$$

$$X_m = \rho_X \frac{\pi(d+a)}{S} = 1 \cdot 10^4 \frac{3,14(10+0,8)}{1,14} = 29,75 \cdot 10^4 \text{ 1/Гн};$$

$$Z_m = \sqrt{R_m^2 + X_m^2} = \sqrt{(95,3 \cdot 10^4)^2 + (29,8 \cdot 10^4)^2} = 92,74 \cdot 10^4 \text{ 1/Гн.}$$

Величина и фаза тока

$$I = F_K / w = \Phi Z_m / w = 13,7 \cdot 10^{-5} \cdot 92,74 \cdot 10^4 / 1000 = 0,137 \text{ А};$$

$$\varphi = \arctg(R_m / X_m) = \arctg(95,2 \cdot 10^4 / 29,75 \cdot 10^4) = 72,65^\circ.$$

Потери на вихревые токи и гистерезис в стали

$$P_c = 4k_\Phi f \Phi^2 X_m = 4 \cdot 1,11 \cdot 50 \cdot (13,7 \cdot 10^{-5})^2 \cdot 29,75 \cdot 10^4 = 1,24 \text{ Вт},$$

где  $k_\Phi = 1,11$  – коэффициент формы поля.

Ответ:  $I = 0,137 \text{ А}; P_c = 1,24 \text{ Вт}$ .

## 2.6. Электромагниты электрических аппаратов

### 2.6.1. Понятие электромагнит

**Электромагнитные устройства** служат для создания магнитного поля с помощью обмотки, обтекаемой электрическим током. Во многих электромагнитных устройствах магнитное поле используют для создания электромагнитных сил, вызывающих перемещение подвижных частей и совершающих механическую работу. При этом подвижные части движутся по заданной траектории и преодолевают силы сопротивления, определяемые механической характеристикой. Такие электромагнитные устройства называются **электромагнитными механизмами (ЭММ)**. ЭММ используются в электроаппаратостроении в основном в качестве приводов.

Электромагнитные механизмы, имеющие магнитную систему из ферромагнитных материалов, иногда называют **электромагнитами (ЭМ)**. Электромагниты применяются в контакторах, пускателях, реле, автоматах, электромагнитных муфтах и т.д.

**По способу действия** электромагниты подразделяют на **удерживающие**, служащие для удержания грузов (электромагниты подъемных

кранов) и *притягивающие*, которые совершают работу, притягивая свой якорь.

По способу включения в электрическую цепь электромагниты могут быть с *параллельной* (включаются на полное напряжение сети) или с *последовательной обмоткой* (включаются в цепь с сопротивлением нагрузки).

По роду тока обмотки различают электромагниты *постоянного* и *переменного* тока. Электромагниты постоянного тока могут быть *нейтральными* (нечувствительными к направлению тока в обмотке) и *поляризованными* (срабатывают лишь при определенном направлении тока).

По времени действия имеются *быстродействующие*, с *нормальным временем действия* и *замедленные* электромагниты.

По характеру движения якоря различают *поворотные* (якорь поворачивается вокруг оси или опоры) и *прямоходовые* (якорь перемещается поступательно) электромагниты.

### 2.6.2. Устройство и принцип действия электромагнита

Электромагнит состоит из *магнитной цепи* и *обмотки* 2 (рис. 29). Подвижная часть магнитной цепи называется *якорем* 1. Участки магнитопровода 3 и 4 называются *стержнями*, или *сердечниками*.

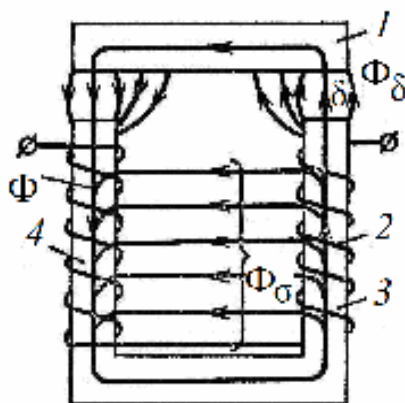


Рис. 29. Устройство электромагнита

На рис. 30 приведены наиболее характерные разновидности электромагнитных систем, применяемых в электрических аппаратах: клапанная (а); бронева (б); Ш-образная (в); соленоидная (г); с поворотным якорем (д); для герконов (е); плоская для многоконтактных реле (ж); с Z-образным якорем для реле защиты с высоким коэффициентом возврата (з).

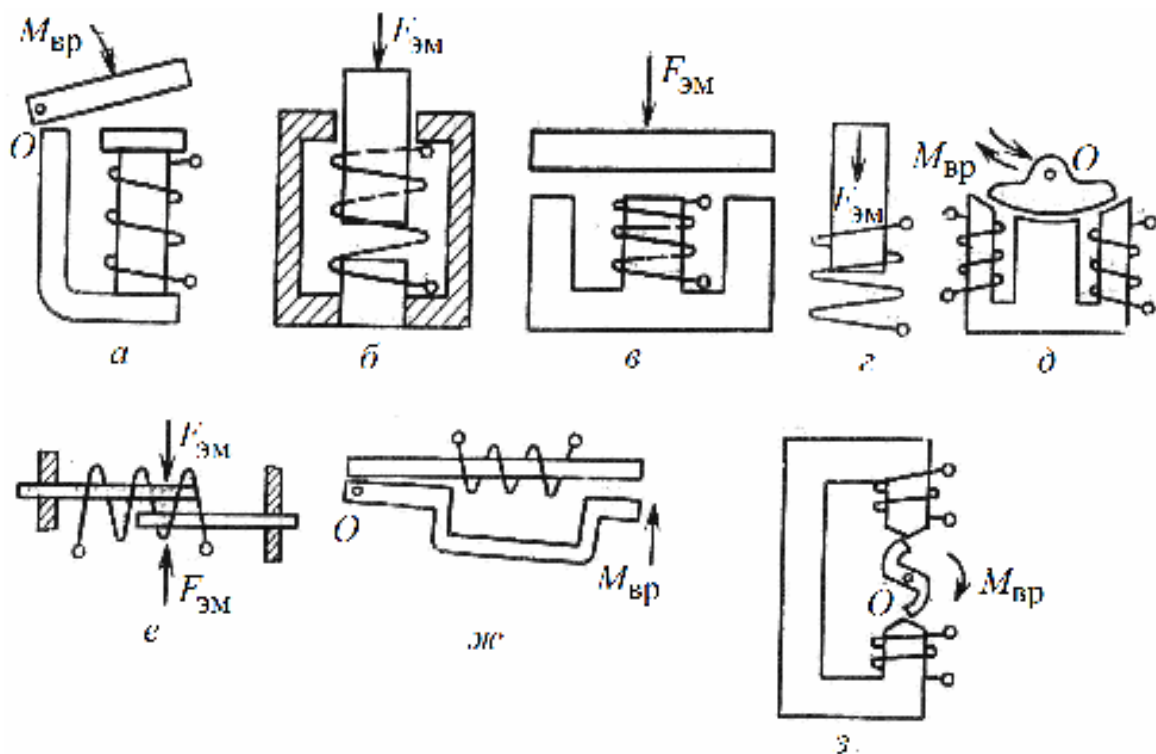


Рис. 30. Разновидности электромагнитных систем

При прохождении тока по обмотке (намагничивающей катушке) 2 создается намагничивающая сила (НС), под действием которой возбуждается магнитный поток  $\Phi$ . Этот поток замыкается через воздушный зазор и между другими частями магнитной цепи, имеющими различные магнитные потенциалы. Воздушный зазор, меняющийся при перемещении якоря, называется рабочим. В рабочих зазорах развивается электромагнитная сила, осуществляющая перемещение (притяжение) якоря. От якоря сила передается приводимому в движение механизму. Якорь может быть расположен снаружи по отношению к обмотке (рис. 30, а, в, д, з) – внешний притягивающийся якорь или внутри обмотки (рис. 30, б, г, е) – втягивающийся якорь. Магнитный поток, проходящий через рабочий зазор, называется рабочим. Все остальные потоки называются потоками рассеяния.

### 2.6.3. Электромагнитная сила

Расчет *электромагнитной силы*, развиваемой электромагнитом постоянного тока, базируется на уравнении энергетического баланса электромагнита

$$U idt = i^2 R dt + id\psi. \quad (73)$$

Левая часть уравнения (73) определяет величину электрической энергии, поступающей в систему за время  $dt$ , а первый член правой

части выражает потери в активном сопротивлении. Последнее должно учитывать также и потери от вихревых токов. Потери от вихревых токов сравнительно невелики, и ими можно пренебречь при рассмотрении энергетических преобразований. Второй член в правой части уравнения (73) равен электрической энергии, преобразованной электромагнитом в магнитную при изменении потокосцепления за время  $dt$ .

Для расчета электромагнитной силы используются графоаналитические и аналитические методы.

Для любого момента времени справедливо

$$\int_0^t U i dt = \int_0^t i^2 R dt + \int_0^{\psi} i d\psi, \quad (74)$$

где  $\psi$  – значение потокосцепления к моменту времени  $t$ .

Пока электромагнитная сила электромагнита меньше силы возвратной пружины, якорь неподвижен и потокосцепление нарастает при неизменном значении начального рабочего зазора  $\delta_1$  (рис. 31, кривая 1). При достижении определенного значения потокосцепления ( $\psi_1$ ) электромагнитная сила превысит силу возвратной пружины, и под ее действием якорь переместится в положение, при котором рабочий зазор станет равен  $\delta_2$ . Потокосцепление при этом увеличится до значения  $\psi_2$ , а ток по переходной кривой  $ad$  – до значения  $i_2$ . Зависимость  $\psi(i)$  при зазоре  $\delta_2$  изображена кривой 2 (рис. 31).

До начала трогания якоря энергия магнитного поля, запасенная в цепи,

$$A_1 = \int_0^{\psi_1} i d\psi = m_i m_\psi S_{0ab}, \quad (75)$$

где  $m_i$  – масштаб по оси тока, А/;  $m_\psi$  – масштаб по оси потокосцепления, Вб/мм;  $S_{0ab}$  – площадь криволинейного треугольника  $0ab$ , мм<sup>2</sup>.

После перемещения якоря энергия магнитного поля возрастет на величину

$$A_2 = \int_{\psi_1}^{\psi_2} i d\psi = m_i m_\psi S_{abcd}, \quad (76)$$

где  $S_{abcd}$  – площадь криволинейной трапеции  $abcd$ .

При изменении зазора от  $\delta_1$  до  $\delta_2$  якорем совершена механическая работа  $A_3$ . Энергия, накопленная в магнитном поле к концу хода якоря,

$$A_4 = \int_0^{\psi_2} i d\psi = m_i m_\psi S_{0cd}. \quad (77)$$

На основании закона сохранения энергии можно записать, что

$$A_1 + A_2 = A_3 + A_4. \quad (78)$$

Тогда механическая работа, совершенная якорем,

$$A_3 = A_1 + A_2 - A_4. \quad (79)$$

Согласно рис. 31 эта энергия

$$A_3 = m_i m_\psi (S_{0ab} + S_{abcd} + S_{0cd}) = m_i m_\psi S_{0ad}. \quad (80)$$

Средняя электромагнитная сила при перемещении якоря от  $\delta_1$  до  $\delta_2$

$$F_{\text{эср}} = A_3 / \Delta x = -A_3 / \Delta\delta = -A_3 / (\delta_2 - \delta_1), \quad (81)$$

где  $\Delta x$  – перемещение якоря;  $\Delta\delta$  – изменение зазора.

Если перейти на бесконечно малое изменение зазора  $d\delta$  и учесть, что  $x = \delta_1 - \delta$  и  $dx = -d\delta$ , получим

$$F_{\text{э}} = -dA_3 / d\delta. \quad (82)$$

Электромагнитная сила действует в сторону уменьшения зазора.

Для каждого элементарного перемещения можно определить свое значение  $A_3$  и среднюю электромагнитную силу на данном участке хода якоря.

Зависимость электромагнитной силы от рабочего зазора при неизменном токе  $I$  в обмотке называется **статической тяговой характеристикой** электромагнита (рис. 32). Для электромагнита с поворотным якорем под статической тяговой характеристикой понимается зависимость момента на якоре от угла его поворота, снятая при неизменном токе обмотки.

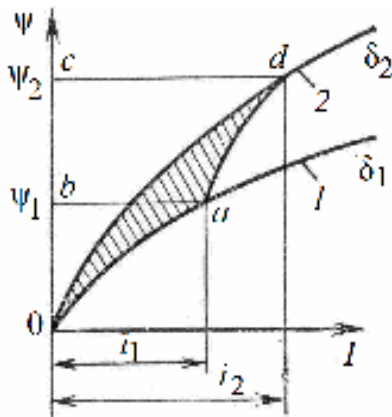


Рис. 31. К графическому определению энергии в электромагните

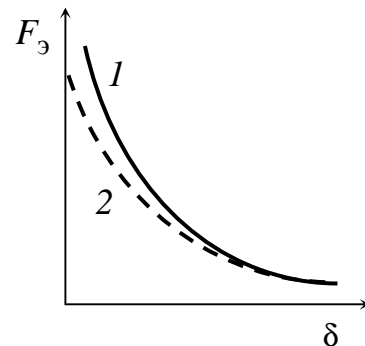


Рис. 32. Статическая тяговая характеристика

Для статической тяговой характеристики ток в цепи не меняется и электромагнитная сила рассчитывается как

$$F_{\text{э}} = -\frac{1}{2} I \frac{d\psi}{d\delta}. \quad (83)$$

Если пренебречь влиянием потоков рассеяния и насыщения стали выражение (83) приобретает вид

$$F_{\text{э}} = -\frac{1}{2} F_{\delta}^2 \frac{d\Lambda_{\delta}}{d\delta}, \quad (84)$$

где  $F_{\delta}$  – падение магнитного потенциала в воздушном зазоре, А.

Для расчета электромагнитной силы при равномерном поле в рабочем зазоре и ненасыщенных полюсах применяется формула Максвелла (для электромагнита с одним рабочим зазором)

$$F_{\text{э}} = \frac{1}{2\mu_0} B_{\delta}^2 S = \frac{1}{2} \frac{\Phi_{\delta}^2}{\mu_0 S}, \quad (85)$$

где  $B_{\delta}$  – индукция, Тл;  $\Phi_{\delta}$  – магнитный поток в рабочем зазоре, Вб;  $S$  – площадь полюса, м<sup>2</sup>.

Статические тяговые характеристики могут меняться в широких пределах путем изменения формы полюсов и конструктивного исполнения электромагнита. Выбор полюсов и исполнения магнитной системы электромагнита диктуется характеристикой противодействующих сил или моментов.

При выводе выражений для электромагнитной силы электромагнитов переменного тока принимается предположение о синусоидальном характере тока и потока. Мгновенное значение электромагнитной силы в однофазном электромагните изменяется от нуля до максимального значения  $F_{\text{э max}}$  с частотой, в два раза превышающей частоту переменного тока, питающего электромагнит:

$$F_{\text{э}} = F_{\text{э max}} \sin^2 \omega t = \frac{F_{\text{э max}}}{2} - \frac{F_{\text{э max}}}{2} \cos 2\omega t. \quad (86)$$

Амплитудное значение силы для однофазных систем без экранирующего витка при равномерном поле в рабочем зазоре и ненасыщенной магнитной системе определяется по формуле Максвелла

$$F_{\text{э max}} = \frac{\Phi_{\text{max}}^2}{2\mu_0 S}, \quad (87)$$

где  $S$  – площадь полюса.

Среднее значение электромагнитной силы за период обычно принимается за расчетное значение полезной силы

$$F_{\text{эср}} = \frac{1}{T} \int_0^T F_{\text{э}} dt = F_{\text{эmax}} / 2. \quad (88)$$

Изменение электромагнитной силы во времени отрицательно сказывается на работе электромагнита. В определенные моменты времени сила возвратной пружины становится больше электромагнитной, что вызывает отрыв якоря от сердечника. При нарастании электромагнитной силы якорь вновь притягивается к сердечнику. В результате якорь непрерывно вибрирует, что нарушает работу контактов. Создается шум, расшатывается магнитная система. Для устранения вибраций в однофазных электромагнитах используются короткозамкнутые витки из меди или алюминия.

Трехфазные электромагниты применяются в электромеханических тормозных устройствах электрических приводов, грузоподъемных и других устройствах.

В трехфазном электромагните при магнитной симметрии фаз и отсутствии насыщения результирующая сила, действующая на якорь, равна сумме сил отдельных фаз и во времени не меняется. Однако вибрации якоря полностью не устраняются, так как точка приложения результирующей силы изменяется, а противодействующей силы – неизменна.

В электромагните переменного тока электромагнитная сила в 2 раза меньше, чем в электромагните постоянного тока при том же значении индукции. В отличие от электромагнита постоянного тока тяговая сила электромагнита переменного тока с обмоткой параллельного включения возрастает по ходу якоря незначительно. Это обусловлено тем, что магнитный поток с уменьшением воздушного зазора увеличивается только за счет уменьшения потокоцепления от потока рассеяния (поток в рабочем зазоре падает только за счет активного падения напряжения в обмотке). Такие электромагниты могут работать при относительно больших воздушных зазорах (ходах якоря). Тяговые характеристики электромагнитов переменного тока могут быть улучшены при питании обмотки выпрямленным переменным током.

#### **2.6.4. Динамика электромагнита**

В статическом режиме работают тормозные и удерживающие электромагниты. В большинстве электромагнитов процесс срабатывания имеет *динамический характер*.

После включения обмотки электромагнита происходит нарастание магнитного потока до тех пор, пока электромагнитная сила не станет равной противодействующей. После этого якорь начинает двигаться, причем ток и магнитный поток будут продолжать изменяться по закону, определяемому параметрами электромагнита и противодействующей силой. После достижения якорем конечного положения ток и магнитный поток будут изменяться до тех пор, пока не достигнут установившихся значений.

**Время срабатывания электромагнита** – это время с момента подачи сигнала срабатывания на обмотку электромагнита до момента остановки якоря.

**Время срабатывания при включении** – промежуток времени с момента включения обмотки до момента полного притяжения якоря:

$$t_{\text{ср.вкл}} = t_{\text{тр}} + t_{\text{дв}}, \quad (89)$$

где  $t_{\text{тр}}$  – время трогания (время с момента включения обмотки до момента начала движения якоря);  $t_{\text{дв}}$  – время движения (время перемещения якоря из положения при начальном зазоре  $\delta_{\text{н}}$  до положения при конечном зазоре  $\delta_{\text{к}}$ ).

Время трогания можно определить из уравнения

$$U = iRdt + d\psi / dt. \quad (90)$$

В начальном положении якоря рабочий зазор относительно велик. Магнитную цепь можно считать ненасыщенной, а индуктивность обмотки – неизменной, при этом уравнение (90) преобразуется к виду

$$U = iRdt + Ldi / dt. \quad (91)$$

Решение уравнения (91) имеет вид

$$i = I_y(1 - e^{-t/T}), \quad (92)$$

где  $I_y = U / R$  – установившееся значение тока;  $T = L / R$  – постоянная времени цепи.

Ток обмотки, при котором начинается движение якоря, называется **током трогания**  $i_{\text{тр}}$ .

Для момента трогания выражение (92) можно записать в виде

$$i_{\text{тр}} = I_y(1 - e^{-t_{\text{тр}}/T}). \quad (93)$$

Решение уравнения (93) относительно  $t_{\text{тр}}$  –

$$t_{\text{тр}} = \frac{L}{R} \ln \frac{1}{1 - i_{\text{тр}} / I_y}. \quad (94)$$



Как только начинается движение якоря, зазор уменьшается, его магнитная проводимость  $\Lambda_\delta$  и индуктивность обмотки  $L = w^2 \Lambda_\delta$  увеличиваются. При этом уравнение (90) принимает вид

$$U = iR + L di / dt + idL / dt. \quad (95)$$

При движении якоря  $dL / dt > 0$ , поэтому  $i$  и  $di / dt$  начинают уменьшаться. Зависимость тока от времени показана на рис. 33. Чем больше скорость движения якоря, тем больше спад тока. В точке  $b$ , соответствующей крайнему положению якоря, уменьшение тока прекращается. Далее ток меняется по закону

$$i = I_0 e^{-t/T_1} + I_y (1 - e^{-t/T_1}), \quad (96)$$

где  $T_1 = L_k / R_k$  – постоянная времени при конечном зазоре  $\delta = \delta_k$ .

Во время движения якоря ток в обмотке меньше установившегося. Поэтому электромагнитная сила, развиваемая электромагнитом в динамике, меньше, чем в статике, при  $\delta = \text{const}$ .

При движении якоря физические процессы в электромагните описываются уравнениями

$$U = iR + d\psi / dt; \quad (97)$$

$$F_\delta dx = d(mv^2) / 2 + F_{\text{пр}} dx,$$

где  $dx$  – путь, пройденный якорем;  $m$  – масса подвижных частей, приведенная к зазору;  $v$  – скорость перемещения якоря, приведенная к зазору;  $F_{\text{пр}}$  – противодействующая сила пружины, приведенная к зазору.

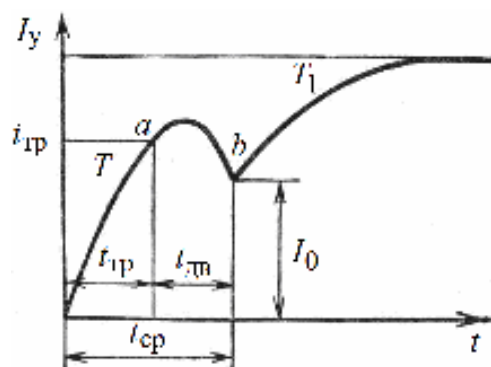


Рис. 33. Кривая изменения тока во времени при срабатывании

Вторым уравнением описывается энергетический баланс в электромагните. Работа, произведенная электромагнитом, затрачивается на увеличение кинетической энергии его подвижных частей и преодоление

противодействующих сил. Оба эти уравнения нелинейны, и их решение затруднительно. Ориентировочно определить время движения якоря можно с помощью статической тяговой характеристики электромагнита и характеристики противодействующих сил.

При отключении обмотки электромагнита магнитный поток начинает уменьшаться из-за введения в цепь большого сопротивления дугового или тлеющего разряда между контактами. В момент, когда электромагнитная сила становится меньше силы пружины, происходит отпущение якоря.

**Время срабатывания при отключении** – промежуток времени с момента отключения обмотки (или ее закорачивания) до момента возврата якоря в первоначальное положение:

$$t_{\text{ср.откл}} = t_{\text{сп}} + t_{\text{дв}}, \quad (98)$$

где  $t_{\text{сп}}$  – время спада потока от установившегося значения  $\Phi_y$  до потока отпущения  $\Phi_{\text{отп}}$ ;  $t_{\text{дв}}$  – время движения.

Процесс отпущения описывается уравнением

$$U = iR_d + iR + L_k \frac{di}{dt}, \quad (99)$$

где  $R_d$  – сопротивление дуги (искры).

Если положить  $R_d = \text{const}$ , то решение уравнения (99) принимает вид

$$i = \left( \frac{U}{R} + \frac{U}{R + R_d} \right) e^{-t/T_k} + \frac{U}{R + R_d}, \quad (100)$$

где  $T_k = L_k / (R_d + R)$  – постоянная времени.

Обычно  $R_d \gg R$ . Тогда

$$i = \frac{U}{R} e^{-t/T_k}. \quad (101)$$

Так как  $R_d$  велико, то  $T_k$  очень мало. Процесс спада тока, а следовательно и магнитного потока протекает очень быстро. Если сердечник, на котором размещается обмотка, сплошной и имеет большое сечение, то спад магнитного потока замедляется из-за вихревых токов, поле которых стремится поддерживать спадающий поток.

После трогания якоря его движение происходит за счет силы противодействующей пружины. Если эта сила постоянна и равна среднему значению  $F_{\text{пр.ср}} = (F_k + F_n) / 2$ , где  $F_k, F_n$  – сила пружины при конечном и начальном зазорах, то движение описывается уравнением

$$F_{\text{пр,ср}} = ma = m dv / dt \quad (102)$$

и ускорение

$$a = F_{\text{пр,ср}} / m. \quad (103)$$

Время движения  $t_{\text{дв}} = \sqrt{2(\delta_{\text{н}} - \delta_{\text{к}}) / a}$ , или  $t_{\text{дв}} = \sqrt{2(\delta_{\text{н}} - \delta_{\text{к}})m / F_{\text{пр,ср}}}$ .

Переходный процесс при включении обмотки электромагнита переменного тока описывается уравнением

$$U_{\text{max}} \sin(\omega t + \alpha) = iR + w d\Phi / dt. \quad (104)$$

Для электромагнита с ненасыщенным магнитопроводом решение уравнения (104) имеет вид

$$\Phi = \Phi_{\text{max}} (e^{-tR/L} - \cos \omega t), \quad (105)$$

где  $\Phi_{\text{max}} = \frac{U}{4,44 f w}$  – максимальное значение потока (без учета активного сопротивления обмотки).

Кривая изменения магнитного потока во времени аналогична кривой изменения тока при коротком замыкании – наибольшие пиковые значения магнитного потока (и силы) имеют место в начале включения (примерно через 0,01 с после начала включения при частоте тока  $f = 50$  Гц), чем обеспечивается малое время трогания.

### 2.6.5. Ускорение и замедление срабатывания электромагнита

Для изменения скорости срабатывания применяют специальные методы, которые связаны либо с изменением конструкции и параметров электромагнита, либо с применением специальных схем.

**Для уменьшения времени срабатывания** конструктивным методом уменьшают вихревые токи в магнитопроводе, для чего выполняют его из магнитных материалов с высоким электрическим сопротивлением; в массивных частях делают специальные прорезы, пересекающие пути вихревых токов; выполняют магнитопровод шихтованным. Для уменьшения времени движения уменьшают ход якоря, массу якоря и связанных с ним подвижных частей, а также трение в осях и опорах якоря.

Если конструктивными методами не удастся добиться нужного уменьшения времени, прибегают к применению специальных схем.

Основную часть времени срабатывания при включении составляет время трогания, поэтому для изменения времени срабатывания воздействуют прежде всего на  $t_{\text{тр}}$ .

Время трогания можно уменьшить, если одновременно с увеличением питающего напряжения  $U$  ввести добавочное сопротивление  $R_{\text{доб}}$

(рис. 34, *а*), обеспечивающее постоянство установившегося тока  $I_y = U / (R + R_{доб})$ . Уменьшение времени трогания в этом случае происходит за счет снижения постоянной времени. Недостатком схемы являются потери мощности в добавочном сопротивлении.

В схеме на рис. 34, *б* в первый момент подачи напряжения  $U$  незаряженная емкость  $C$  создает, шунтируя  $R_{доб}$ , дополнительный путь для тока. За счет тока зарядки конденсатора ток в обмотке электромагнита растет быстрее. Недостаток схемы – наличие конденсатора значительной емкости.

В схеме на рис. 34, *в* добавочное сопротивление  $R_{доб}$  шунтируется размыкающим контактом, связанным с якорем электромагнита. При обесточенной обмотке контакт замкнут. При притягивании якоря происходит размыкание контакта, шунтирующего  $R_{доб}$ , и ток нарастает до установившегося значения, равного  $I_y = U / (R + R_{доб})$ . Этот ток должен быть достаточным для удержания якоря в притянутом положении. Недостатком схемы является наличие размыкающего контакта.

Наиболее распространенным конструктивным методом **замедления срабатывания** является демпфирование. При электромагнитном демпфировании применяется короткозамкнутая обмотка, за счет которой происходит увеличение  $t_{тр}$  или  $t_{сп}$ .

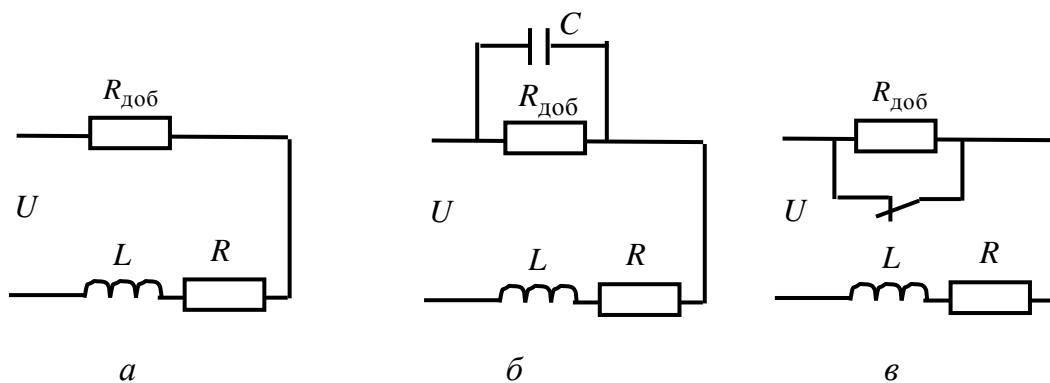


Рис. 34. Схемы ускорения срабатывания электромагнита при включении

Короткозамкнутая (экранирующая) обмотка обычно выполняется в виде медной или алюминиевой гильзы, которая размещается на магнитопроводе. Вихревые токи, появляющиеся в короткозамкнутой обмотке в момент включения или отключения основной обмотки, задерживают изменение магнитного потока и создают замедление при срабатывании, как при притяжении, так и при отпуске якоря. В последнем случае достигается больший замедляющий эффект, так как переходный процесс происходит при притянута якоря, когда индуктивность систе-

мы больше. Замедление времени спада потока при отключении может достигать 10 секунд, тогда как задержка времени трогания якоря при срабатывании составляет доли секунды.

Для получения больших выдержек времени (до нескольких десятков секунд) увеличивают время движения якоря. Для этого якорь электромагнита присоединяют к демпфирующему устройству, создающему противодействующую силу, пропорциональную скорости перемещения. Устройства, замедляющие срабатывание, могут быть механическими (анкерные, часовые механизмы), гидравлическими и пневматическими.

Увеличение времени трогания якоря при срабатывании электромагнита достигается также схемными способами. Если  $U$  фиксировано, время трогания может быть увеличено включением добавочного сопротивления  $R_{\text{доб}}$ . Это время можно также увеличить, включив последовательно с обмоткой электромагнита индуктивность, что ведет к увеличению постоянной времени цепи, не изменяя установившегося тока. Схемные способы применяются также для увеличения времени спада потока при отключении обмотки электромагнита и отпуске якоря.

На рис. 35, *а* показана схема с сопротивлением  $R_{\text{ш}}$ , включенным параллельно обмотке электромагнита. Это сопротивление образует с обмоткой замкнутый контур для переходного тока с постоянной времени  $T_k = L_k / (R + R_{\text{ш}})$ . Недостатком схемы являются потери мощности в  $R_{\text{ш}}$ . В схемах, представленных на рис. 35, *б* и *в*, этот недостаток отсутствует.

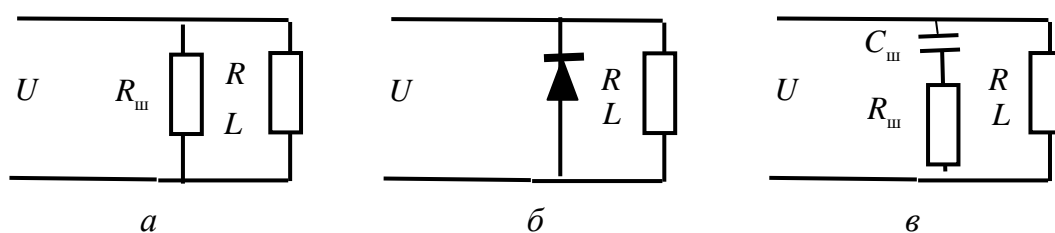


Рис. 35. Схемы замедления срабатывания электромагнита при включении

Следует указать, что в схеме рис. 35, *в* для нормальной работы электромагнита необходимо создать апериодический переходный процесс, который обеспечивается выбором достаточно большого активного сопротивления  $R + R_{\text{ш}}$ .

## 2.6.6. Примеры решения задач

**Пример 1.** Рассчитайте электромагнитную силу подковообразного электромагнита (рис. 36) при воздушном зазоре  $\delta = 0,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$  и намагничивающей силе  $F_\delta = 708 \text{ А}$ .

Геометрические размеры электромагнита:  $d_{\text{пн}} = 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ;  $h_{\text{пн}} = 0,3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ;  $l = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ .

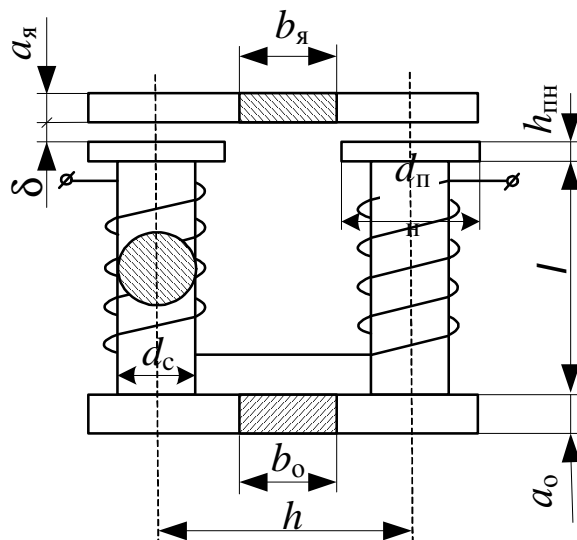


Рис. 36. Подковообразный электромагнит

*Решение.* Электромагнитная сила для одного воздушного зазора определяется по формуле (без учета насыщения и потоков рассеяния)

$$F_3 = -\frac{1}{2} F_\delta^2 \frac{d\Lambda_\delta}{d\delta} = -\frac{1}{2} 708^2 \cdot (-2,9 \cdot 10^{-4}) = 72 \text{ Н},$$

где производная проводимости воздушного зазора для подковообразного электромагнита, имеющего полюсный наконечник (табл. П.6),

$$\begin{aligned} \frac{d\Lambda_\delta}{d\delta} &= -\frac{\mu_0}{2} \left( \frac{\pi d_{\text{пн}}^2}{4\delta^2} + \frac{0,22 d_{\text{пн}} h_{\text{пн}}}{(0,22\delta + 0,4 h_{\text{пн}})^2} \right) = -\frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2} \times \\ &\times \left( \frac{\pi \cdot (2,4 \cdot 10^{-2})^2}{4 \cdot (0,1 \cdot 10^{-2})^2} + \frac{0,22 \cdot 2,4 \cdot 10^{-2} \cdot 0,3 \cdot 10^{-2}}{(0,22 \cdot 0,1 \cdot 10^{-2} + 0,4 \cdot 0,3 \cdot 10^{-2})^2} \right) = \\ &= 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ ГН/м}. \end{aligned}$$

*Ответ:*  $F_3 = 72 \text{ Н}$ .

**Пример 2.** Определите диаметр медного провода обмотки постоянного тока, необходимый для создания намагничивающей силы  $F = 600$  А при напряжении питания  $U = 110$  В. Внутренний  $D_{\text{вн}}$  и наружный  $D_{\text{нар}}$  диаметры катушки – 34 и 50 мм, ее температура  $\theta = 80$  °С.

*Решение.* Сечение обмоточного провода  $q$  находим, исходя из необходимой МДС  $F = Iw = \frac{U}{R} w = \frac{Uqw}{\rho l_{\text{ср}} w} = \frac{Uq}{\rho l_{\text{ср}}}$ :

$$q = F \rho l_{\text{ср}} / U = 600 \cdot 2,18 \cdot 10^{-8} \cdot 0,132 / 110 = 1,57 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2,$$

где  $\rho = \rho_0(1 + \alpha\theta) = 1,62 \cdot 10^{-8}(1 + 0,0043 \cdot 80) = 2,18 \cdot 10^{-8}$  Ом·м – удельное электрическое сопротивление материала провода при температуре  $\theta = 80$  °С;  $l_{\text{ср}} = \pi(D_{\text{нар}} + D_{\text{вн}}) / 2 = \pi(50 + 34) \cdot 10^{-3} / 2 = 0,132$  м – средняя длина витка катушки.

Диаметр провода обмотки

$$d = \sqrt{4q / \pi} = \sqrt{4 \cdot 1,57 \cdot 10^{-8} / 3,14} = 0,14 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

*Ответ:*  $d = 0,14 \cdot 10^{-3}$  м.

**Пример 3.** На рис. 37 показан эскиз быстродействующего электромагнита с втягивающимся якорем, который на постоянном токе при магнитодвижущей силе обмотки  $F = 2670$  А (число витков  $w = 248$ , ток  $I = 10,8$  А) и начальном рабочем зазоре  $\delta_{\text{н}}$  создает магнитный поток  $\Phi_{\text{max}} = 8,5 \cdot 10^{-4}$  Вб и развивает электромагнитную силу  $F_{\text{э}} = 342$  Н.

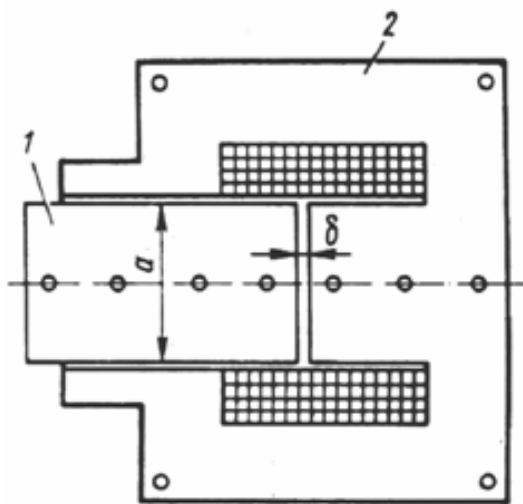


Рис. 37. Эскиз магнитопровода

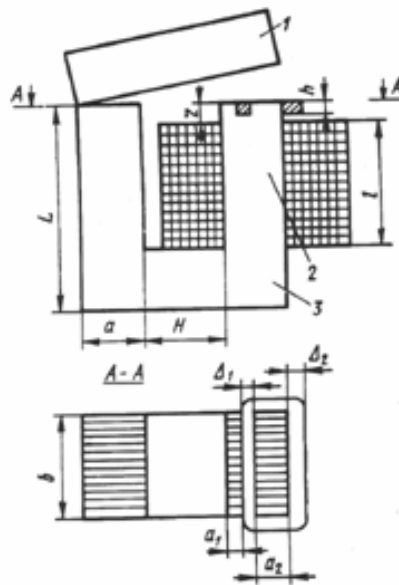


Рис. 38. Эскиз электромагнита

Определить число витков, необходимое для создания такого же магнитного потока (амплитудное значение) в случае питания обмотки переменным током напряжением  $U = 127$  В с частотой  $f = 50$  Гц, а также развиваемую этим потоком электромагнитную силу и намагничивающий ток при том же значении магнитодвижущей силы обмотки.

*Решение.* Число витков катушки электромагнита переменного тока

$$w = U / (4,44 f \Phi_{\max}) = 127 / (4,44 \cdot 50 \cdot 8,5 \cdot 10^{-4}) = 673.$$

Намагничивающий ток обмотки  $I_{\max} = F / w = 2670 / 673 = 3,97$  А.

Вычислив площадь стали полюса  $S = a^2 k_c = (3 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 0,93 = 8,4 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>, определим амплитудное значение электромагнитной силы

$$F_{\max} = \frac{1}{2} \frac{\Phi_{\max}^2}{\mu_0 S} = \frac{1}{2} \frac{(8,5 \cdot 10^{-4})^2}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 8,4 \cdot 10^{-4}} = 342,4 \text{ Н.}$$

Средняя сила  $F_{\text{ср}} = 342,4 / 2 = 171,2$  Н.

*Ответ:*  $w = 673$ ;  $F_{\max} = 342,4$  Н;  $F_{\text{ср}} = 171,2$  Н;  $I_{\max} = 3,97$  А.

**Пример 4.** Для клапанного электромагнита переменного тока (рис. 38) определить активное сопротивление экранирующего витка. Геометрические размеры электромагнита:  $\Delta_1 = 2 \cdot 10^{-3}$  м;  $\Delta_2 = 4 \cdot 10^{-3}$  м;  $a_1 = 3 \cdot 10^{-3}$  м;  $a_2 = 7 \cdot 10^{-3}$  м;  $a = 12 \cdot 10^{-3}$  м;  $b = 20 \cdot 10^{-3}$  м;  $h = 3 \cdot 10^{-3}$  м;  $H = 20 \cdot 10^{-3}$  м;  $L = 52 \cdot 10^{-3}$  м. Виток выполнен из латуни; его температура  $\theta = 80$  °С.

*Решение.* Удельное электрическое сопротивление материала витка при температуре  $\theta = 80$  °С

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha \theta) = 7 \cdot 10^{-8} (1 + 0,0015 \cdot 80) = 7,84 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

Для латуни удельное электрическое сопротивление  $\rho_0 = 7 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, температурный коэффициент  $\alpha = 0,0015$  1/°С.

Активное сопротивление витка

$$\begin{aligned} r &= \rho \left( \frac{b + \Delta_2}{\Delta_1 h} + \frac{b + 2a_2 + 2\Delta_2 + \Delta_1}{\Delta_2 h} \right) = 7,84 \cdot 10^{-8} \times \\ &\times \left( \frac{20 \cdot 10^{-3} + 4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-3}} + \frac{20 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 7 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-3}} \right) = \\ &= 6,01 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.} \end{aligned}$$

*Ответ:*  $r = 6,01 \cdot 10^{-4}$  Ом.



**Пример 5.** Для быстродействующего электромагнита постоянного тока (рис. 38) рассчитать время срабатывания, если зазор  $\delta_n = 0,24 \cdot 10^{-2}$  м, число витков  $w = 248$ , индуктивность обмотки  $L_n = 0,034$  Гн, активное сопротивление  $R = 1,12$  Ом, напряжение питания  $U = 12$  В, начальная противодействующая сила  $F_{н.пр} = 223$  Н, ток трогания  $i_{тр} = 6,9$  А, масса подвижных частей  $m = 0,44$  кг.

*Решение.* Время трогания определим по формуле (94):

$$t_{тр} = \frac{L}{R} \ln \frac{1}{1 - i_{тр} / I_y} = \frac{0,034}{1,12} \ln \frac{1}{1 - 6,9 / 10,7} = 31,4 \cdot 10^{-3} \text{ с},$$

где  $I_y = U / R = 12 / 1,12 = 10,7$  А – установившееся значение тока.

Для быстродействующих электромагнитов время движения определяется по формуле

$$\begin{aligned} t_{дв} &= \sqrt[3]{3\delta_n m / (U \sqrt{F_{пр.н} / (2\delta_n L_n)} - R F_{пр.н} / L_n)} = \\ &= \sqrt[3]{3 \cdot 0,24 \cdot 10^{-2} \cdot 0,44 / (12 \sqrt{223 / (2 \cdot 0,24 \cdot 10^{-2} \cdot 0,034)} - 1,12 \cdot 223 / 0,034)} = \\ &= 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ с}. \end{aligned}$$

Время срабатывания определим по формуле

$$t_{ср.вкл} = t_{тр} + t_{дв} = 31,4 \cdot 10^{-3} + 7,8 \cdot 10^{-3} = 39,2 \cdot 10^{-3} \text{ с}.$$

*Ответ:*  $t_{ср.вкл} = 39,2 \cdot 10^{-3}$  с.

## 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ НИЗКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

### 3.1. Контактторы и пускатели

**Контактторы и пускатели** – это оперативные аппараты, коммутирующие электрические цепи нагрузки в нормальных режимах работы электрооборудования.

#### 3.1.1. Понятие *контактор*. Классификация контакторов

**Контактор** – электрический аппарат с дистанционным управлением, предназначенный для частых коммутаций силовых электрических цепей при нормальных токах нагрузки, а также для редких отключений при токах перегрузки.

Электромагнитные контакторы могут использоваться не только для коммутации цепи по команде оператора, но и (при соответствующем выборе параметров электромагнитных приводов) для защиты электрооборудования от понижения напряжения в сети.

Контактор имеет два коммутационных положения, соответствующих включенному и отключенному состояниям.

**По роду тока коммутируемой цепи** контакторы подразделяют на *контакторы постоянного и переменного тока* (промышленной и повышенной частоты).

Род коммутируемого тока определяет специфические конструктивные особенности контакторов. Поэтому контакторы переменного и постоянного тока обычно не взаимозаменяемы. Однако имеются и такие серии контакторов, которые могут коммутировать электрические цепи как постоянного, так и переменного тока.

**В зависимости от привода** различают контакторы *электромагнитные* и *пневматические*.

Наиболее широкое распространение нашли электромагнитные приводы. Контактторы постоянного тока приводятся в действие, как правило, электромагнитом постоянного тока. Электромагниты контакторов переменного тока могут быть как переменного, так и постоянного тока.

В цепях электрической тяги, при номинальных токах выше 100–200 А, применяют пневматические контакторы, приводимые в действие сжатым воздухом.

**По положению главных контактов** различают *контакторы с нормально открытыми, нормально закрытыми и смешанными контактами*.

### 3.1.2. Общие сведения о контакторах

Основными техническими данными контакторов являются: *номинальный ток главных контактов, предельный отключаемый ток, номинальное напряжение коммутируемой цепи, механическая и коммутационная износостойкость, допустимое число включений в час, собственное время включения и отключения.*

*Номинальный ток главных контактов*  $I_H$  составляет 3–4000 А, коммутируемый ток достигает  $(6–10)I_H$  (например, пусковые токи асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором). Для режима пуска двигателей с фазным ротором и торможения противовключением характерны 2,5–4-кратные токи перегрузки. Номинальные напряжения коммутируемых цепей – 220, 440, 750 В при постоянном токе; 380, 660 В – при переменном токе.

*Механическая износостойкость* контактора определяется числом циклов включение-отключение без замены его узлов и деталей (ток цепи при этом равен нулю) и составляет  $(10–20)10^6$  операций.

Согласно стандарту различают пять классов механической износостойкости.

*Коммутационная износостойкость* определяется таким числом включений и отключений цепи с током, после которого требуется замена контактов. Современные контакторы должны иметь коммутационную износостойкость порядка  $(2–3)10^6$  операций.

*Собственное время срабатывания* (время от момента подачи питания на катушку до момента касания контактов) при включении состоит из времени нарастания потока до значения потока трогания и времени движения якоря. У контакторов постоянного тока большая часть времени тратится на нарастание потока (0,15–0,25 с). Для контакторов переменного тока время срабатывания составляет 0,03–0,05 с (переходный процесс при включении протекает в течение  $1/4$  периода).

*Собственное время отключения* (отпускания) – время от момента снятия напряжения с катушки до момента размыкания контактов. Для контакторов постоянного тока время отпускания составляет 0,07–0,2 с, для контакторов переменного тока – 0,02 с.

**Требования, предъявляемые к контакторам, и условия их работы** определены стандартами.

Контакторы должны обладать высокой механической и коммутационной износостойкостью, технологичностью конструкции, высокой надежностью; обеспечивать длительный срок службы при большой частоте включений (до 3600 включений в час).

**Категории применения** контакторов обусловлены различными режимами отключения электрических цепей контакторами.

Стандартами регламентированы следующие категории применения **контакторов переменного тока**:

АС–1 – активная или малоиндуктивная нагрузка;

АС–2 – пуск электродвигателей с фазным ротором, торможение противовключением;

АС–3 – пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Отключение вращающихся двигателей при номинальной нагрузке;

АС–4 – пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Отключение неподвижных или медленно вращающихся двигателей. Торможение противовключением.

Для **контакторов постоянного тока** существуют следующие категории применения:

ДС–1 – активная или малоиндуктивная нагрузка;

ДС–2 – пуск электродвигателей постоянного тока с параллельным возбуждением и их отключение при номинальной частоте вращения;

ДС–3 – пуск электродвигателей постоянного тока с параллельным возбуждением и их отключение при неподвижном или медленно вращающемся роторе;

ДС–4 – пуск электродвигателей постоянного тока с последовательным возбуждением и их отключение при номинальной частоте вращения;

ДС–5 – пуск электродвигателей постоянного тока с последовательным возбуждением, отключение неподвижных или медленно вращающихся двигателей, торможение противовключением.

Условия отключения цепи контакторами во многом определяются отношением индуктивности  $L$  нагрузки к ее активному сопротивлению  $R$ ; чем выше это отношение, тем труднее условия отключения. Легкие условия наблюдаются при отключении электрических печей и сопротивлений, а наиболее тяжелые – при отключении заторможенных двигателей. Так, категории применения АС1 соответствует режим отключения цепи со слабоиндуктивной нагрузкой, когда угол сдвига фаз между током и напряжением цепи близок к нулю. В этих условиях мгновенное значение возрастающего напряжения промышленной частоты (т.е. напряжение источника при переходе через нуль) невелико и скорость восстановления напряжения за переходом тока через нуль мала, процесс отключения цепи переменного тока оказывается для контактора очень легким.

При отключении вращающихся двигателей условия отключения определяются степенью скольжения ротора относительно поля статора. Поле статора в асинхронном двигателе создает основной магнитный по-

ток. При отключении статорной обмотки поток должен исчезнуть, но это вызывает в роторе ток, стремящийся поддержать поток. Поток, создаваемый током ротора, неподвижен по отношению к ротору, но вращается вместе с ротором относительно статора и наводит в нем ЭДС, противоположную по направлению напряжению сети. Чем быстрее вращается ротор (чем меньше скольжение), тем ниже падение напряжения на контактах контактора. ЭДС затухает во времени, так как вращающийся по инерции ротор теряет запас кинетической энергии и ток ротора уменьшается ввиду прекращения поступления энергии из сети. В момент перехода тока через ноль в цепи статора скорость восстановления напряжения, прямо пропорциональная разности напряжения сети и ЭДС, небольшая и условия гашения дуги будут легкими.

Условия отключения цепи наиболее тяжелые при отключении пусковых токов при неподвижном роторе (в этом случае практически отсутствует противоЭДС, скорость восстановления напряжения большая и гашение дуги затруднено).

Характеристики контакторов для разных категорий применения приведены в справочниках.

### 3.1.3. Устройство и принцип действия контактора

Контактор имеет следующие **основные узлы: контактную систему, дугогасительное устройство, привод, систему вспомогательных слаботочных контактов (блок-контактов)**, предназначенных для согласования работы контактора с другими устройствами.

В течение срока службы изношенные контакты могут несколько раз заменяться новыми.

На рис. 39 приведена условная схема контактора.

Главные контакты контактора включены в силовую цепь двигателя Д, обмотка контактора – в цепь управления, содержащую кнопки «Пуск» и «Стоп».

При отключении силовой цепи напряжение с обмотки 16, расположенной на сердечнике 15, снимается и подвижная система под действием возвратной пружины 11 приходит в нормальное состояние.

Возникающая при расхождении главных контактов дуга Д гасится в дугогасительной камере 5, имеющей изоляционные перегородки 4, которые способствуют растяжению дуги, увеличению ее длины и сопротивлению. На выходе камеры установлены металлические пластины 3 пламягасительной решетки. Эти пластины рассеивают остаточный столб дуги. Пламягасительная решетка препятствует выходу ионизированных газов за пределы камеры. Быстрый выход дуги с контактов

в камеру обеспечивается системой магнитного дутья. Обмотка этой системы 17 включена последовательно в цепь главного тока и размещена на стальном сердечнике 1. Две стальные пластины – полюса 18, расположенные по бокам сердечника 1, подводят создаваемое обмоткой 17 магнитное поле к зоне горения дуги в камере. Дугогасительная камера 5 изготавливается из дугостойкого изоляционного материала (например, керамики).

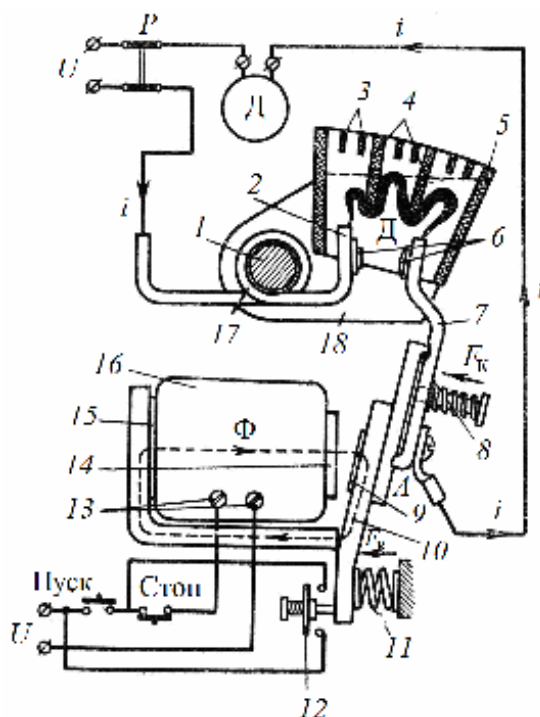


Рис. 39. Конструктивная схема контактора

Включение контактора произойдет, если подать напряжение на зажимы 13 обмотки 16 приводного электромагнита. Это обеспечивается нажатием кнопки «Пуск». Якорь 10 электромагнита притянется к сердечнику, преодолев силы противодействия возвратной 11 и контактной 8 пружин. При включении контактора кнопка «Пуск» окажется зашунтированной блок-контактами 12 контактора. При ее отпускании цепь обмотки 16 не будет разорвана, а контактор останется во включенном состоянии.

Установкой полюсного наконечника 14 на сердечник электромагнита достигается увеличение электромагнитной силы и видоизменение тяговой характеристики. Немагнитная прокладка (например, латунная) 9 на якоре 10 предназначена для уменьшения силы, обусловленной остаточной индукцией, и предохранения якоря от залипания при снятом напряжении с обмотки.

Соприкосновение контактов 7 и 2 происходит раньше, чем якорь электромагнита полностью притянется к полюсу. По мере движения якоря подвижный контакт «проваливается», упираясь своей верхней частью в неподвижный контакт 2. Он повернется на некоторый угол и вызовет дополнительное нажатие контактной пружины 8. Возникает так называемый провал контактов – смещение подвижного контакта на уровне точки его касания с неподвижным в случае, если неподвижный контакт будет удален. Провал контактов обеспечивает надежное замыкание цепи, когда толщина контактов уменьшается вследствие выгорания их материала под действием электрической дуги. Величина провала определяет запас материала контактов на износ в процессе работы контактора. Величина провала составляет 1–10 мм для пальцевых (рычажных) контактов.

После соприкосновения контактов происходит перекатывание подвижного контакта 7 по неподвижному 2. Контактная пружина создает определенное нажатие в контактах, поэтому при перекатывании происходит разрушение окисных пленок и других химических соединений. При перекатывании точки касания контактов переходят на новые места контактной поверхности, не подвергавшиеся воздействию дуги и являющиеся поэтому чистыми. Все это уменьшает переходное сопротивление контактов и улучшает условия их работы, однако повышает механический износ контактов.

Благодаря предварительному натяжению контактной пружины 8 в момент соприкосновения подвижный контакт оказывает давление на неподвижный. Вследствие этого переходное сопротивление контактов в момент их касания будет небольшим и контактная площадка не разогреется при включении до значительной температуры. Предварительное натяжение контактной пружины 8 позволяет снизить вибрацию подвижного контакта при ударе его о неподвижный. Это предохраняет контакты от приваривания при включении электрической цепи.

Контактные накладки 6, выполненные из специального материала (например, серебра), предназначены для улучшения условий длительного прохождения тока через замкнутые контакты во включенном состоянии. В других случаях применяются контактные накладки из дугостойкого материала (например, металлокерамики) для уменьшения износа контактов под воздействием электрической дуги при частых отключениях цепи.

Совершенствование конструкций контакторов и магнитных пускателей имеет своей целью повышение износоустойчивости, достижение простоты и удобства при монтаже и эксплуатации и снижение себестоимости.

Контакторы постоянного и переменного тока имеют в основном одни и те же конструктивные узлы.

Число контактов у контакторов переменного тока может быть от 1 до 5. Наибольшее распространение получили трехполюсные контакторы (они входят в комплект магнитных пускателей). Дугогасительное устройство по способу гашения дуги отличается от аналогичных устройств контакторов постоянного тока тем, что у контакторов переменного тока гашение дуги осуществляется с помощью коротких дуг, в то время как у контакторов постоянного тока дуга гасится с помощью магнитного дутья.

Втягивающая катушка контакторов переменного тока отличается тем, что основным параметром (величиной электрического сопротивления является индуктивное сопротивление, а не омическое, как в катушке постоянного тока). Поэтому число витков втягивающей катушки на переменном токе примерно в 10 раз меньше, чем на постоянном.

Магнитная система контакторов переменного тока выполняется шихтованной из листовой электротехнической стали. Магнитные системы обычно П-, Ш-образные и соленоидные.

Для увеличения износостойкости и надежности применяют гибридные контакторы. В таких контакторах имеется полупроводниковая приставка, предназначенная для шунтирования главных контактов. В гибридных контакторах дуга полностью не устраняется, но она существует на контактах в течение короткого времени перехода тока с контактов в полупроводниковую приставку. Переход тока в полупроводниковую приставку начинается с момента достижения напряжением дуги значения, равного пороговому напряжению тиристора. Износ главных контактов от этой кратковременной дуги небольшой и их коммутирующая износостойкость соизмерима с механической.

Существуют также герметизированные (вакуумные, герсиконовые) контакторы. Контактная система герметизированных контакторов работает в среде инертных газов (или в вакууме). Вакуумные контакторы являются разновидностью герметизированных контакторов. Они обладают высокой дугогасительной способностью и высокой электрической прочностью.

### **3.1.4. Магнитные пускатели**

**Магнитный пускатель** – электрический аппарат, предназначенный для пуска, реверса и отключения электродвигателей. Магнитный пускатель, – по существу, контактор переменного или постоянного тока для коммутации цепей двигателей (при переменном токе – асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором).



В магнитный пускатель может встраиваться элемент (наиболее часто – тепловое реле), который осуществляет защиту от токов перегрузки и «потери фазы». В этом случае магнитный пускатель представляет, по существу, комплектное устройство, включающее контактор и реле.

**Пускатели классифицируются:** по *роду тока* главных контактов; *виду схемы* включения электродвигателя (*нереверсивный* или *реверсивный*); *номинальному напряжению* главной цепи; *степени защиты*; *наличию кнопочного поста* на корпусе; *наличию дополнительных* (сигнальных, блокировочных) *контактов, роду тока и по напряжению* втягивающей катушки.

Схема реверсивного пускателя изображена на рис. 40.

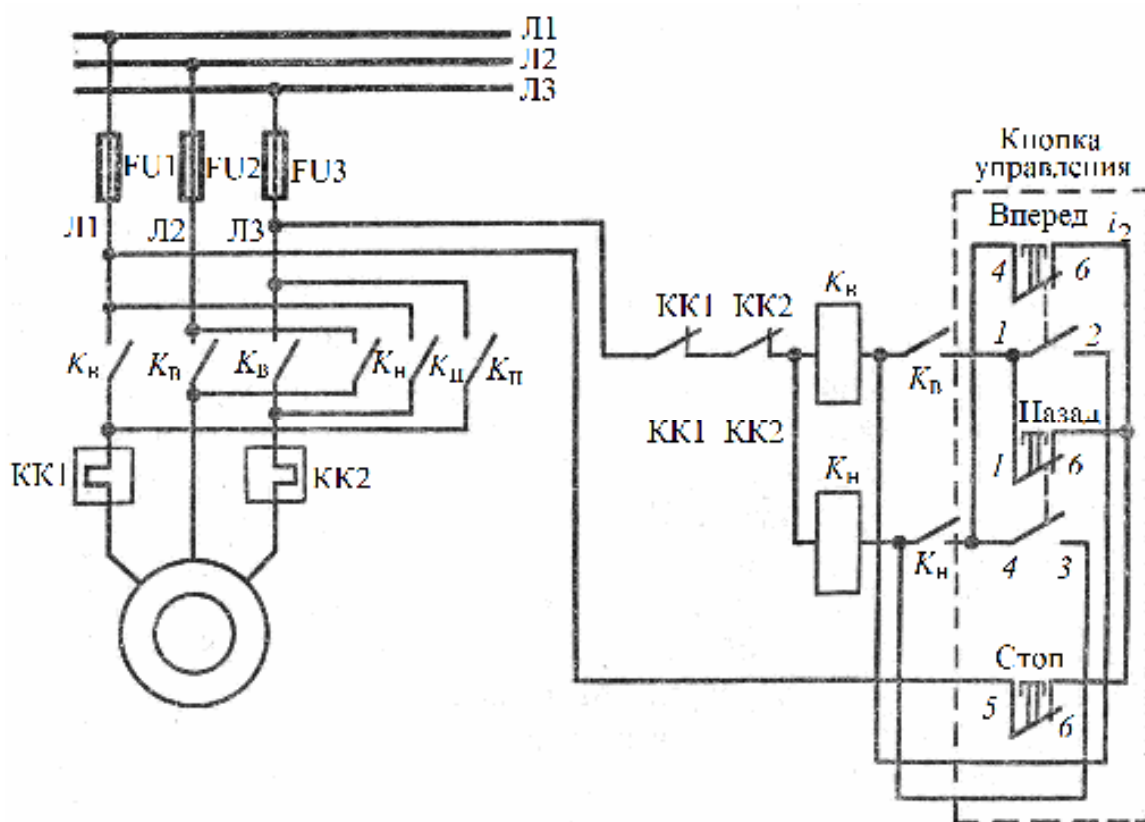


Рис. 40. Схема реверсивного пускателя

Такой пускатель, помимо защиты и пуска двигателя, позволяет осуществить его реверс с помощью изменения последовательности чередования фаз. Реверсивный пускатель содержит два контактора, якоря которых соединены между собой рычагом механической блокировки.

При пуске «Вперед» замыкаются контакты 1–2. Цепь обмотки контактора КВ замыкается через размыкающие контакты 1–6 кнопки «Назад». Одновременно размыкаются размыкающие контакты 4–6 кнопки

«Вперед», разрывается цепь катушки контактора КН. При нажатии кнопки «Назад» вначале размыкаются контакты 1–6, обесточивается катушка контактора КВ и отключаются его контакты. Затем контактами 4–3 включается контактор КН, после чего замыкаются его контакты. При этом очередность фаз питания двигателя становится обратной. При одновременном нажатии кнопок «Вперед» и «Назад» оба контактора не включатся. Это есть электрическая блокировка. Часто применяется комбинированная блокировка для устранения перегрева катушки.

## 3.2. Реле

### 3.2.1. Общие сведения о реле

**Реле** – электрический аппарат, в котором при плавном изменении управляющего (входного) сигнала до определенной заданной величины происходит скачкообразное изменение управляемого (выходного) сигнала. При этом один из сигналов является электрическим.

Реле состоит из трех основных **функциональных элементов: воспринимающего, промежуточного и исполнительного. Воспринимающий элемент** реагирует на входной параметр (ток, напряжение и т.д.) и преобразует его в физическую величину (например, электромагнитную силу), необходимую для работы реле. Конструктивное исполнение воспринимающего элемента определяется в основном параметром, на которое должно реагировать реле. В реле тока и напряжения воспринимающий элемент – электромагнит, в реле давления – мембрана, в реле уровня – поплавки и т.д. **Промежуточный элемент** (противодействующие пружины и успокоители в контактном реле) передает первичное воздействие от воспринимающего элемента на исполнительный элемент. **Исполнительный элемент** (контакты в контактном реле) воздействует на управляемую цепь.

Реле относится к аппаратам прерывистого управления, так как его рабочее состояние определяется двумя крайними положениями исполнительного элемента: «включено» и «выключено».

По области применения реле подразделяют на *реле для схем автоматики, для управления, регулирования и защиты электропривода, для защиты энергосистем*. С помощью реле управления можно осуществлять пуск, реверсирование, торможение двигателей.

По принципу действия реле делятся на *электромагнитные, поляризованные, магнитоэлектрические, электродинамические, индукционные, тепловые, температурные, полупроводниковые* и др.

**В зависимости от входного сигнала** различают *реле*, реагирующие на *максимальное или минимальное* значения *тока, напряжения, мощности, частоты* и др. Реле может реагировать на разность значений входных сигналов (дифференциальное реле), изменение знака (реле обратной мощности) или скорости входного сигнала.

**По принципу воздействия на управляемую цепь** различают *контактные и бесконтактные реле*. Контактные реле воздействуют на управляемую цепь путем размыкания и замыкания при помощи контактов. Бесконтактные реле (полупроводниковые, магнитные) осуществляют управление за счет скачкообразного (релейного) изменения параметров (активного сопротивления, индуктивности) своего исполнительного элемента, включенного в управляемую цепь. Разомкнутому состоянию контактов контактного реле соответствует большое сопротивление управляемой цепи бесконтактного (закрытое состояние). Замкнутому состоянию контактов контактного реле соответствует малое сопротивление в управляемой цепи бесконтактного реле (открытое состояние).

**По способу включения воспринимающего элемента** реле подразделяют на *первичные, вторичные и промежуточные*. Первичные реле включаются в контролируемую цепь непосредственно, вторичные – через измерительные трансформаторы (тока и напряжения). Промежуточные реле работают от исполнительных элементов других аппаратов и предназначены для усиления сигнала, увеличения числа управляемых цепей.

**По способу воздействия исполнительного элемента на объект управления** различают *реле прямого действия* (реле своим исполнительным элементом непосредственно управляет цепью) и *реле косвенного действия* (такое реле воздействует своим исполнительным элементом на цепь через другие аппараты).

**В зависимости от времени срабатывания** реле можно подразделить на *безинерционные* (время срабатывания меньше 0,001 с), *сверхбыстродействующие* (время срабатывания меньше 0,005 с), *быстродействующие* (время срабатывания меньше 0,05 с), *нормальные* (время срабатывания 0,05–0,25 с), *замедленные* (время срабатывания 0,25–1 с), *реле времени* (время срабатывания зависит от уставки).

Рабочие свойства реле определяются их **основными параметрами и характеристиками**.

Основная характеристика реле – *характеристика управления* (характеристика «вход»–«выход»), представляющая зависимость выходного сигнала  $y$  (например, ток через контакты реле) от входного  $x$  (например, ток в катушке электромагнита реле), рис. 41. В контактных

реле при отсутствии входного сигнала контакты разомкнуты и ток в управляемой цепи равен нулю. Для бесконтактных реле сопротивление в управляемой цепи достаточно велико и ток имеет минимальное значение.

Значение входного сигнала, при котором происходит скачкообразное увеличение выходного сигнала при замыкающем контакте (рис. 41, а, з, д) или уменьшение выходного сигнала при размыкающем контакте (рис. 41, б), называется **величиной (параметром) срабатывания**  $x_{ср}$ . При  $x = x_{ср}$  выходной параметр скачком меняется от  $y_{\min}$  до  $y_{\max}$  (происходит срабатывание реле).

**Величина (параметр) возврата**  $x_{в}$  – значение входного сигнала, при котором происходит скачкообразное уменьшение выходного сигнала при замыкающем контакте (рис. 41, а, з, д) или увеличение выходного сигнала при размыкающем контакте (рис. 41, б).

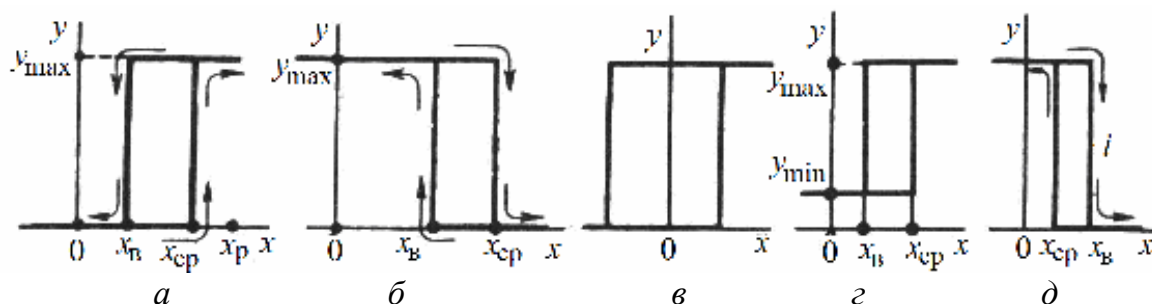


Рис. 41. Схемы ускорения срабатывания электромагнита при включении

Время с момента подачи сигнала на срабатывание до начала возрастания или уменьшения выходного сигнала называется **временем срабатывания**. Время срабатывания зависит от конструкции реле, схемы его включения и входного сигнала. Чем больше значение входного сигнала  $x_{раб}$  по сравнению с  $x_{ср}$ , тем быстрее срабатывает реле. Время с момента подачи сигнала на отключение до достижения минимального или максимального значения выходного сигнала называется **временем возврата**.

Реле также характеризуются: **коэффициентом запаса** (отношение входного сигнала к параметру срабатывания  $k_з = x_{раб}/x_{ср}$ ), **коэффициентом возврата** (отношение параметра возврата к параметру срабатывания  $k_в = x_{в}/x_{ср} = 0,2 - 0,99$ ), **коэффициентом усиления** (отношение максимальной мощности нагрузки в управляемой (выходной) цепи к минимальной мощности входного сигнала срабатывания).

Значение входного сигнала, при котором происходит срабатывание или возврат, называется *уставкой по входному сигналу*.

Одним из параметров реле является *чувствительность* (минимальная входная мощность, которая еще способна вызвать скачкообразное изменение выходной величины). Например, применительно к электромагнитным реле чувствительность характеризуется МДС срабатывания и выражается через минимальные ток или напряжение срабатывания.

**Требования, предъявляемые к реле**, определяются их назначением.

К *реле защиты энергосистем* предъявляются требования *селективности* (способность реле отключать только поврежденный участок энергосистемы), *быстродействия*, *чувствительности и надежности*.

Высокое быстродействие позволяет снизить последствия аварии, сохранить устойчивость системы при аварийных режимах, обеспечить высокое качество электроэнергии.

Увеличение чувствительности позволяет улучшить качество электротехнических устройств. Например, повышение чувствительности релейной защиты позволяет сократить длину линии электропередачи, которая не может быть защищена от аварийных режимов.

Высокая надежность реле не позволяет развиваться тяжелым авариям, приводящим к недоотпуску большого количества электроэнергии.

Реле защиты энергосистем эксплуатируются, как правило, в облегченных условиях. Они не подвержены воздействию ударов, вибрации, пыли и газов, вызывающих коррозию. Так как аварийные режимы в энергосистеме редки, к этим реле не предъявляются высокие требования в отношении износостойкости.

*Реле для управления и защиты электроприводов* работают в тяжелых условиях эксплуатации: возможны удары, вибрация, воздух часто засорен пылью или агрессивными производственными примесями. Так как частота включения в современных схемах электропривода достигает 1000–1200 и более включений в час, реле управления должны иметь *механическую и электрическую износостойкость* до  $(1-10)10^6$  циклов. К таким реле предъявляют определенные требования в отношении *вибростойкости*.

К *реле для схем автоматики* предъявляется требование *высокой надежности*, так как надежность работы схем автоматики зависит от надежности работы отдельных реле.

### 3.2.2. Типы реле

**Электромагнитные реле** благодаря простоте конструкции и надежности в работе широко применяются в схемах электропривода и в схемах защиты энергосистем.

Работа электромагнитных реле основана на электромагнитном принципе. Такие реле приводятся в действие с помощью электромагнитов постоянного или переменного тока. Основными системами в конструкции электромагнитных реле тока и напряжения являются: электромагнитная, механическая (механизм), контактная.

На рис. 42 изображена схема электромагнитного реле, контролирующего значение тока нагрузки  $I_H$  в цепи. Сопротивление  $Z_0$  обмотки реле  $W$  практически не влияет на величину  $I_{нг}$ , так как  $Z_{нг} \gg Z_0$ .

При достижении током  $I_{нг}$  критического значения электромагнитная сила  $F_3$  притяжения якоря 2 к магнитопроводу 1 оказывается достаточной для преодоления силы возвратной пружины. Якорь притягивается, контакты  $K_1$  размыкаются и отключают объект управления  $O_1$ , а контакты  $K_2$  замыкаются и включают объект управления  $O_2$  под напряжение  $U_1$ .

При уменьшении тока  $I_{нг}$  до определенного значения сила  $F_3$  будет недостаточна для удержания якоря. Под действием силы возвратной пружины  $F_{пр}$  якорь перейдет в первоначальное положение и контакты  $K_1$  и  $K_2$  переключат объекты  $O_1$  и  $O_2$ . Таким образом, реле осуществляет автоматическое управления объектами нагрузки в зависимости от значения тока  $I_{нг}$ .

Для контроля уменьшения входного сигнала используют минимальные реле. Например, контакты минимального реле напряжения отключают установку при снижении напряжения сети ниже допустимого. Напряжением срабатывания таких реле является напряжение, при котором происходит отпускание якоря, а напряжением возврата – напряжение, при котором якорь притягивается к магнитопроводу электромагнита. Коэффициент возврата  $k_b < 1$ .

Существуют реле тока и напряжения, в которых предусмотрена возможность регулирования тока или напряжения срабатывания (возврата). Ток срабатывания можно регулировать изменением числа витков обмотки, силы натяжения возвратной пружины, величины рабочего воздушного зазора.

Для нормальной работы реле его тяговые характеристики 1, 2 (рис. 43) должны быть согласованы с механической 3 (характеристикой

противодействующих сил). Для срабатывания реле необходимо, чтобы тяговая характеристика во всех точках хода якоря проходила выше механической (кривая 1), а для возврата – ниже (кривая 2). Наименьшее значение тока, при котором тяговая характеристика проходит выше механической, определяет ток трогания  $I_{тр}$ . Коэффициент запаса  $\kappa_3 = I_{раб} / I_{тр}$  составляет обычно 1,4. С ростом  $\kappa_3$  увеличивается электромагнитная сила, сокращается время включения, но возрастают удары в механизме и вибрация якоря. Характеристике 2 соответствует ток возврата  $I_B$ .

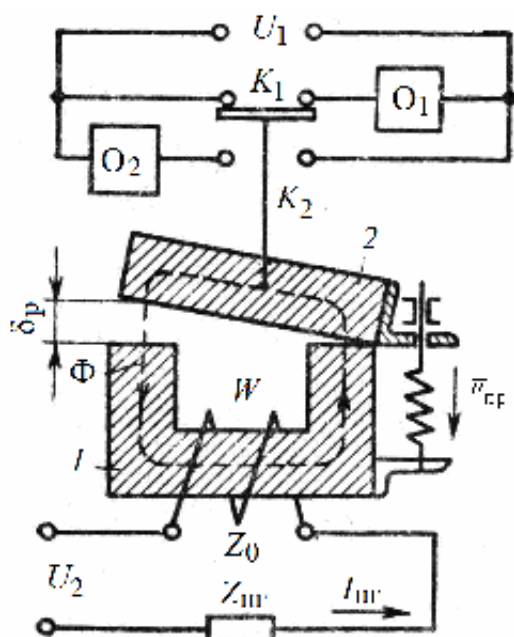
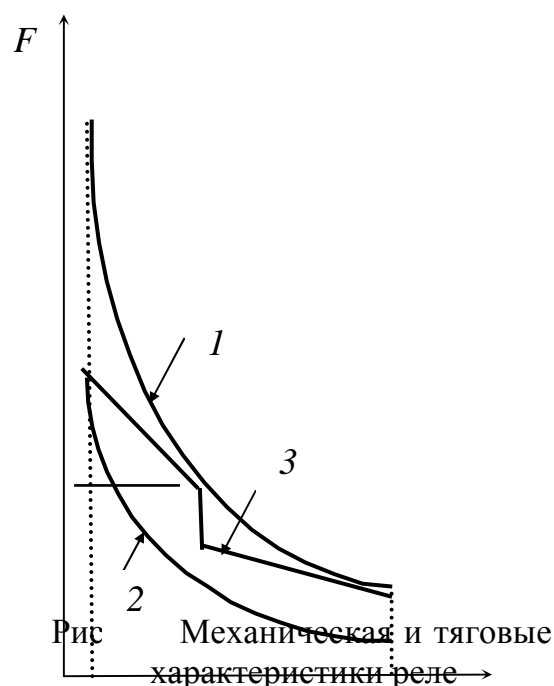


Рис. 42. Условная схема реле



Для реле защиты энергосистем и эл  $\delta_k$  приводов, к  $\delta_n$  и  $\delta_{л-г}$  ющих значение тока в узких пределах, коэффициент возврата должен быть возможно ближе к единице. Для повышения коэффициента возврата сближают тяговую и механическую характеристики за счет увеличения значения воздушного конечного зазора (меняется ток возврата), уменьшения хода якоря, выбора формы якоря и полюсов (меняется форма тяговой характеристики). Высокий коэффициент возврата в реле переменного тока объясняется более пологой тяговой характеристикой. Иногда для изменения тока срабатывания меняется начальная сила возвратной пружины за счет изменения ее натяжения. С ростом начального натяжения коэффициент возврата уменьшается.

В **поляризованных реле**, кроме основного потока, создаваемого обмоткой электромагнита  $\Phi_p$ , действует дополнительный поляризующий магнитный поток, создаваемый постоянным магнитом  $\Phi_{\Pi}$ . Благодаря поляризующему потоку направление электромагнитной силы, действующей на якорь, изменяется в зависимости от направления тока в обмотке.

На рис. 44 показаны магнитные цепи поляризованных реле. Последовательная магнитная цепь применяется редко из-за следующих недостатков: 1) требуется повышенное значение МДС рабочей обмотки из-за малой магнитной проницаемости постоянного магнита; 2) постоянный магнит подвержен действию рабочего потока и размагничивается при встречном направлении рабочего и поляризующего потоков.

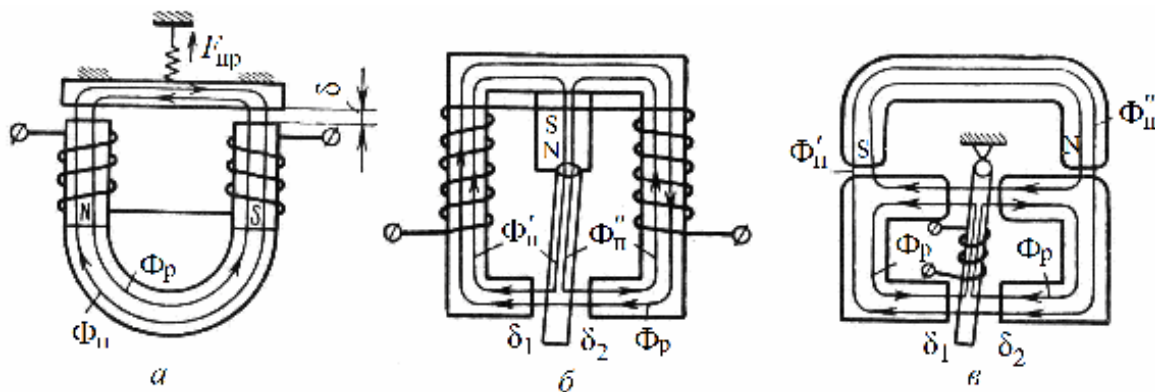


Рис. 44. Магнитные системы поляризованных реле:  
а – последовательная; б – параллельная; в – мостовая

Результирующая сила, действующая на якорь, равна разности сил, создаваемых в зазорах  $\delta_1$  и  $\delta_2$ :

$$F_{\text{рез}} = F_{\delta_1} - F_{\delta_2} = \frac{1}{2\mu_0 S_{\Pi}} \left[ (\Phi_{\Pi}' - \Phi_p)^2 - (\Phi_{\Pi}'' + \Phi_p)^2 \right].$$

Если значения  $\delta_1$  и  $\delta_2$  близки, то намагничивающая сила срабатывания мала. Благодаря этому мощность срабатывания таких реле снижается до 10 Вт. Сила контактного нажатия определяется разностью значений  $\delta_1$  и  $\delta_2$ . Чем ближе эти значения, тем меньше контактное нажатие, которое обычно не превышает  $(1-5)10^{-2}$  Н.

Контактные системы поляризованных реле могут иметь различное исполнение (рис. 45). При двухпозиционном исполнении с преобладанием, при отсутствии тока в обмотке, якорь всегда находится в одном положении (рис. 45, а). Перемещение якоря может происходить только при определенном направлении тока в обмотке. При отключении тока



якорь возвращается в исходное положение. При двухпозиционном исполнении без преобладания, при отсутствии тока в рабочей обмотке, якорь занимает положение около одного или другого полюса электромагнита, в зависимости от предшествующего направления тока в обмотке (рис. 45, б). Перемещение якоря происходит при направлении тока в рабочей обмотке, противоположном направлению, имевшему место при предыдущем включении. После отключения тока якорь остается в положении, которое он занял в процессе срабатывания.

Существует система с трехпозиционной настройкой. Положение контактов зависит от полярности предыдущего импульса тока. Якорь, укрепленный на плоской пружине, при обесточенной катушке находится в нейтральном (среднем) положении. В зависимости от полярности тока катушки замыкается левый или правый контакт. После отключения тока якорь возвращается в нейтральное положение (рис. 45, в).

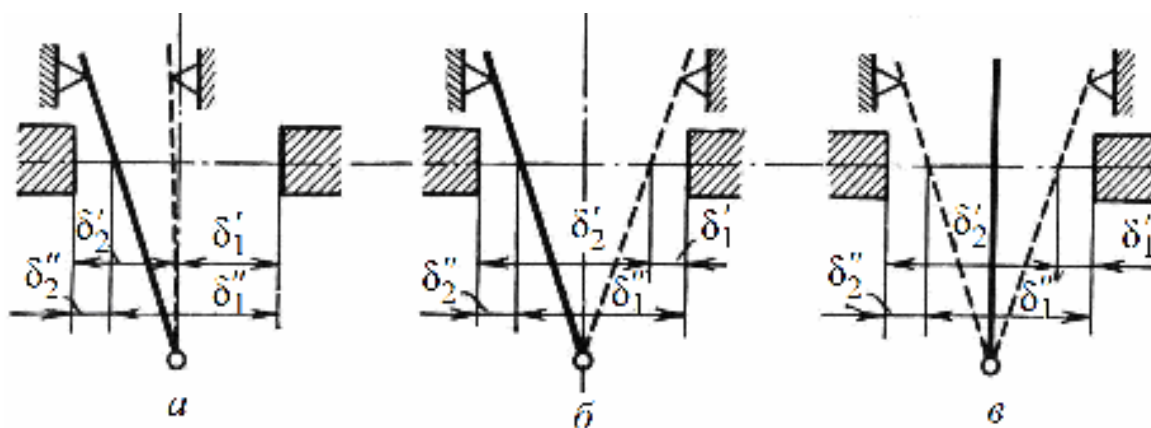


Рис. 45. Настройки поляризованных реле

В практике наиболее широко распространены реле типа РП, допускающие частоту переключений до 200 в секунду при магнитодвижущей силе срабатывания 1,5–2 А. Длительный ток контактов – 0,2 А, напряжение коммутируемой цепи – 24 В.

Поляризованные электромагнитные реле обеспечивают широкие функциональные возможности (состояние контактной системы зависит от полярности управляющего импульса), возможность управления кратковременными импульсами (замкнутое состояние сохраняется после снятия сигнала), высокое быстродействие (несколько миллисекунд), экономичность (после срабатывания не потребляется мощность), высокие чувствительность (мощность срабатывания – 0,01–0,001 Вт) и коэффициент усиления, возможность создания различных настроек.

**Реле времени** служат для создания выдержки времени между срабатываниями нескольких аппаратов в схемах защиты автоматики и при автоматизации технологических процессов.

К таким реле предъявляется требование стабильности выдержки времени при колебаниях напряжения, частоты питания, температуры и т.д. Для схем автоматического управления электроприводом требуемые выдержки времени находятся в пределах 0,25–10 с. Разброс времени срабатывания может составлять 10 %. Реле для защиты энергосистем должны иметь большую точность выдержки времени. Требуемые выдержки времени таких реле – 0,1–20 с. Для автоматизации технологических процессов необходимы реле с большой выдержкой времени – от нескольких часов до нескольких минут. В этом случае, как правило, используют *моторные* и *полупроводниковые реле*.

В *реле времени с электромагнитным замедлением* использован принцип электромагнитного замедления. В качестве короткозамкнутой обмотки используется алюминиевая или медная гильза, надеваемая на сердечник. При включении обмотки электромагнита реле или при ее отключении в такой гильзе наводится ЭДС и вихревые токи, создающие поток, препятствующий изменению потока обмотки электромагнита. При этом замедление при срабатывании небольшое (доли секунды) из-за малой индуктивности и постоянной времени при большом (начальном) зазоре. Замедление при отпуске может достигать десяти секунд, так как при отпуске проводимость конечного зазора большая, и, следовательно, большая индуктивность и постоянная времени. Для получения большой выдержки времени при отпуске необходима высокая магнитная проводимость рабочего и паразитного зазоров в замкнутом состоянии магнитной системы. С этой целью все соприкасающиеся детали магнитопровода и якоря тщательно шлифуются.

На рис. 46, а изображена конструктивная схема реле с электромагнитным возбуждением. Здесь 1 – катушка электромагнита; 2 – магнитопровод; 3 – короткозамкнутая гильза; б – якорь. Время срабатывания при отпуске можно регулировать изменением толщины немагнитной прокладки 7. Уменьшение толщины прокладки увеличивает проводимость, индуктивность, постоянную времени и соответственно время отпуска реле (рис. 46, б). Чем больше сила пружины 4, регулируемая гайкой 5, тем больше поток отпуска и тем меньше время срабатывания при отпуске (рис. 46, в).

Магнитная цепь такого реле делается насыщенной для того, чтобы уменьшить зависимость магнитного потока и выдержки времени от питающего напряжения.

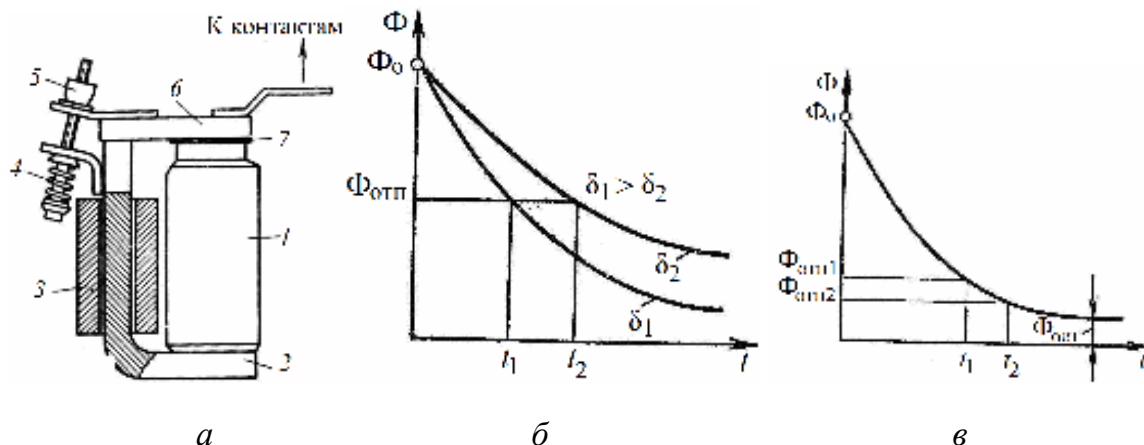


Рис. 46. Конструктивная схема и динамические характеристики реле с электромагнитным замедлением

У реальных магнитных материалов после отключения намагничивающей обмотки поток падает до остаточного потока, который определяется свойствами материала магнитопровода, геометрическими размерами магнитной цепи и магнитной проводимостью рабочего зазора. При большом остаточном потоке возможно залипание якоря (якорь остается в притянутом состоянии после отключения обмотки электромагнита). Для устранения залипания используется тонкая немагнитная прокладка.

Реле времени с электромагнитным замедлением достаточно просты по конструкции, обладают большой ударо-, вибро- и износостойкостью. Допустимое число включений достигает 600 в час. Они могут использоваться в схемах автоматики и электропривода как реле тока, напряжения и промежуточные. Коэффициент возврата низок и составляет 0,1–0,3. Выдержки времени при отпускании – 0,3–5 секунд.

Промышленностью выпускаются многочисленные модификации реле с электромагнитным замедлением. Реле имеют один или два унифицированных контактных узла. Каждый узел имеет один замыкающий и один размыкающий контакты с общей точкой. Постоянный ток включения контактов составляет 10 А при напряжении 110 В и 5 А при 220 В. Ток отключения для индуктивной нагрузки – 0,2 А, для активной нагрузки – 0,5 А.

**В реле с пневматическим замедлением и анкерным механизмом** электромагнит постоянного или переменного тока воздействует на контактную систему через замедляющее устройство в виде пневматического демпфера или часового (анкерного) механизма. Выдержка времени меняется при регулировке этого устройства. Преимуществами такого реле являются возможность питания как постоянным, так и переменным

током и независимость от напряжения, частоты питания, температуры. Реле с пневматическим замедлением РВП применяется в схемах электропривода металлорежущих станков и других механизмов. Такое реле позволяет регулировать выдержку времени в диапазоне от 0,4 до 180 секунд с точностью  $\pm 10\%$ .

В замедлителях в виде анкерного механизма его пружина заводится под воздействием электромагнита. Контакты реле приходят в движение лишь после того, как связанный с ними анкерный механизм отсчитает определенное время уставки. Выдержка времени у этих реле регулируется в пределах от 7 до 17 секунд с точностью  $\pm 10\%$  уставки. В реле имеются и нерегулируемые контакты, которые связаны с якорем электромагнита и используются в цепях, не требующих выдержки времени. Реле надежно работают при напряжении питания до  $0,85 U_H$ . Износостойкость анкерного механизма составляет всего 15000 срабатываний, поэтому такие реле не применяют при частых включениях.

В состав **моторных реле** времени входит электродвигатель с заданной частотой вращения. Промышленностью выпускаются реле на выдержки времени от 1 секунды до 26 минут с различным исполнением контактов. Точность работы реле составляет  $\pm 5$  секунд. Реле позволяет устанавливать различную выдержку времени в пяти независимых цепях. Износостойкость реле – не менее 1000 циклов.

**Герконовые реле** – это реле с герметичными магнитоуправляемыми контактами. Контакты герконовых реле 1, 2, 3 (контактные сердечники) помещаются в стеклянный баллон с инертным газом или вакуумом (рис. 47). Контакты в этих реле выполняют функции магнитопровода, токопровода и возвратной пружины.

При подаче тока в обмотку  $w$  (рис. 47, а) возникает магнитный поток  $\Phi$  и электромагнитная сила, притягивающая контакты. Если отключить ток, то под действием собственных упругих сил контакты разомкнутся. Изменение полярности тока в обмотке управления поляризованного реле (рис. 47, б) вызывает переключение контактов (1 и 2 или 1 и 3).

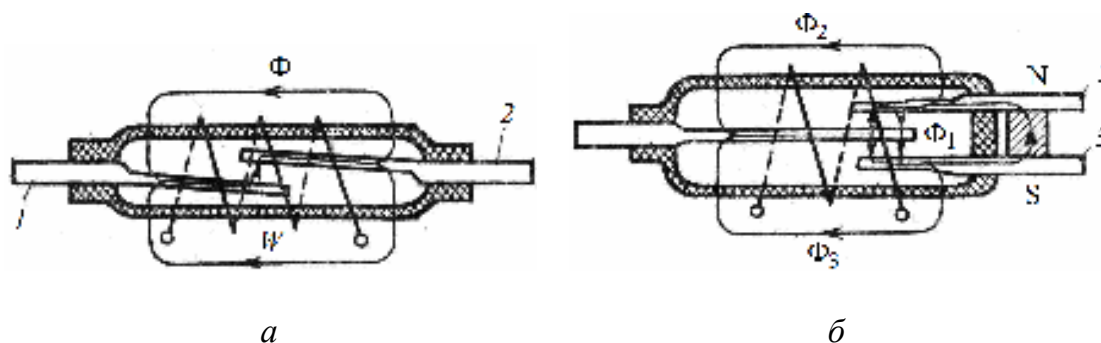


Рис. 47. Герконовые реле

Существуют разновидности герконов с ртутными контактами. В небольшом объеме ртути (подвижный контакт), содержащемся в герметичном баллоне, размещается ферромагнитная деталь (поплавок). Под действием магнитного поля управляемой катушки эта деталь погружается в ртуть и поднимает ее уровень до замыкания неподвижных контактов.

Благодаря полной герметизации герконовые реле могут работать в неблагоприятных условиях окружающей среды и при неблагоприятных параметрах (при низком переходном сопротивлении, малом напряжении на контактах). Они имеют простую конструкцию, малые массы и габариты, высокое быстродействие (1–3 мс), высокую частоту коммутаций – 1000 включений в секунду, высокую электрическую прочность межконтактного промежутка. В них отсутствуют трущиеся детали. Герконовые реле обеспечивают удобство согласования с современными изделиями микроэлектроники и надежность работы в широком диапазоне температур. Их износостойкость достигает десятков и сотен миллионов срабатываний.

Герконы имеют следующие недостатки: восприимчивость к внешним магнитным полям (необходима защита), хрупкость стеклянного баллона, чувствительность к ударам и вибрациям (необходима амортизация мест установки герконов), значительное время вибрации контактов, малую мощность коммутируемых цепей, возможность самопроизвольного размыкания контактов при больших токах, значительный технологический разброс параметров. Герконовые реле используются в схемах автоматики и защиты в качестве логических элементов, в качестве преобразователей неэлектрических величин в электрические, как электромеханические усилители сигналов между полупроводниковыми устройствами и силовыми электрическими аппаратами.

Параметры коммутируемых цепей для чисто активной нагрузки следующие: коммутируемая мощность – 0,3–200 Вт, коммутируемый ток – 0,03–3 А, коммутируемое напряжение – 20–250 В, время срабатывания – 0,8–10 мс, время отпускания – 0,3–8 мс, МДС срабатывания – 35–300 А, МДС отпускания – 6–62 А, максимальный коэффициент возврата – 0,85–0,9, минимальный коэффициент возврата – 0,2–0,5.

**Тепловые реле** предназначены для защиты электроустановок, главным образом электрических машин, от перегрева при длительных перегрузках.

Тепловое реле срабатывает при определенной температуре нагрева основного чувствительного элемента. В качестве чувствительного элемента наибольшее распространение получили биметаллические элементы. Нагрев элемента может быть непосредственным (за счет тепла, вы-

деляемого током нагрузки), косвенным (за счет тепла нагревательного элемента НЭ, рис. 48, *а*) и комбинированным.

Биметаллический элемент состоит из двух пластин металла (с различными температурными коэффициентами линейного расширения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ ), соединенных сваркой или прокаткой в горячем состоянии. В тепловых реле применяются биметаллы, у которых в качестве терморезистивного материала (с большим значением  $\alpha$ ) используется железоникелевый сплав – инвар, а в качестве термоактивного материала (с меньшим значением  $\alpha$ ) – хромоникелевые, молибденоникелевые стали.

Если такой элемент закрепить неподвижно и нагреть, то произойдет его изгиб в сторону металла с меньшим коэффициентом линейного расширения. Механическая сила, затрачиваемая на преодоление сил, противодействующих изгибу, используется для воздействия на исполнительные элементы реле – контакты.

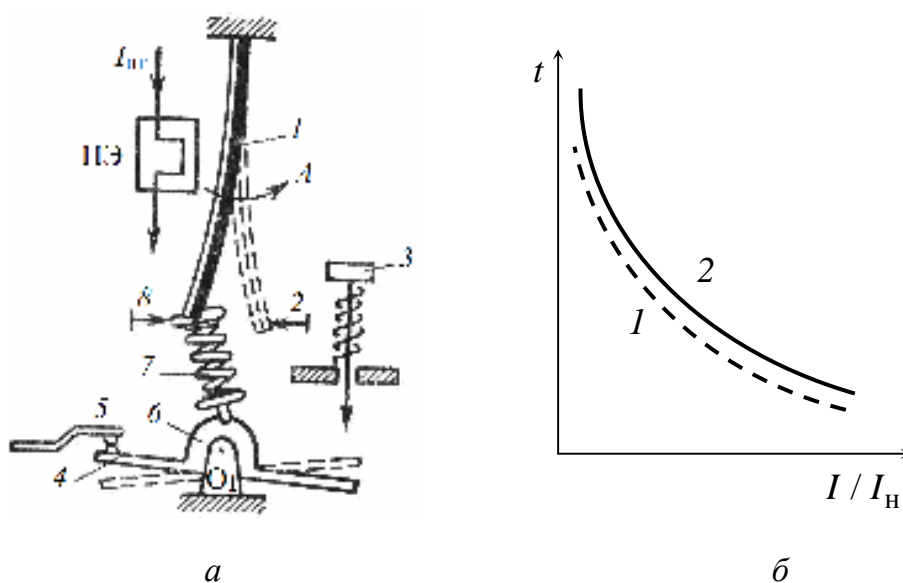


Рис. 48. Конструктивная схема и характеристика теплового реле

Максимальный механический прогиб свободного конца элемента

$$X_{\max} = \frac{3}{4}(\alpha_1 - \alpha_2) \frac{l^2 \tau}{\delta},$$

где  $\alpha_1$  – температурный коэффициент расширения термоактивного материала;  $\alpha_2$  – температурный коэффициент расширения терморезистивного материала;  $\delta$  – суммарная толщина биметаллического элемента;  $l$  – его длина;  $\tau$  – превышение температуры биметаллического элемента относительно окружающей среды.

Сила, развиваемая на прогнутом конце элемента, равна

$$F = \frac{3}{16}(\alpha_1 - \alpha_2) \frac{b\delta^2}{l} E\tau ,$$

где  $b$  – ширина элемента;  $E = (E_1 + E_2)$  – средний модуль упругости материала элемента.

Конструктивная схема реле изображена на рис. 48, *а*. Здесь 1 и 2 – биметаллическая пластина в различных положениях; 3 – кнопка ручного возврата; 4 и 5 – контакты; 6 – пластмассовая колодка; 7 – пружина; 8 – упор. В данном реле происходит мгновенный переброс контактов из одного положения в другое, и нажатие на контакты не зависит от усилия, развиваемого биметаллической пластиной.

В момент достижения предельно допустимой температуры защищаемого объекта (например, обмотки машины) биметаллический элемент должен нагреться до температуры срабатывания (т.е. до температуры, при которой реле замыкает или размыкает свои контакты).

Время срабатывания реле с момента появления перегрузки зависит от начальной температуры окружающей среды, величины тока и конструкции реле.

Одной из основных характеристик тепловых реле является токовременная характеристика, выражающая зависимость времени срабатывания реле от тока, протекающего через него (рис. 48, *б*). Для осуществления надежной защиты необходимо согласовать токовременную характеристику реле с перегрузочной характеристикой двигателя. При правильно выбранном реле его характеристика (рис. 48, *б*, кривая 1) должна располагаться ниже и вблизи характеристики нагрева двигателя (кривая 2). В эксплуатационных условиях согласование характеристик реле и двигателя достигается выбором реле с номинальным током, равным номинальному току двигателя. В этом случае обычно обеспечивается срабатывание реле примерно при  $(1,2-1,3)I_{\text{н}}$ .

Существенным недостатком тепловых реле является зависимость времени действия от температуры окружающей среды. Такая зависимость приводит к тому, что, например, при температуре 80–90 градусов реле может отключить цепь даже при отсутствии тока. Поэтому для получения благоприятной защитной характеристики необходимо, чтобы температура окружающей среды для защищаемого объекта и реле совпадала или чтобы биметаллический элемент работал при более высоких температурах.

Тепловые реле с биметаллическими элементами не обеспечивают защиту от токов короткого замыкания, так как постоянная времени срабатывания реле значительно больше длительности процесса короткого замыкания.

Реле снабжаются *регулятором уставок тока*.

### 3.3. Датчики

#### 3.3.1. Понятие *датчик*. Классификация датчиков

**Датчики** (первичные преобразователи) – аппараты, предназначенные для контроля и (или) измерения параметров.

Датчики применяются в схемах автоматики, телемеханики, информационно-измерительной техники.

**Электрические датчики** служат для преобразования различных физических величин в электрические сигналы. Электрический датчик, подвергаясь воздействию входной (контролируемой) величины любой физической природы, преобразует ее в эквивалентную электрическую величину. Изменение выходного электрического параметра приводит к изменению (коммутации) тока или появлению электродвижущей силы в электрической цепи на выходе датчика. Поэтому датчики принято относить к электрическим аппаратам.

Датчики можно разбить на две большие группы: **параметрические** (пассивные) и **генераторные** (активные).

В параметрических датчиках энергия выходного сигнала обеспечивается за счет энергии входного сигнала, и, следовательно, мощность выходного сигнала меньше входного. Для таких датчиков необходимы электрические источники питания. В зависимости от вида входной величины **параметрические датчики** подразделяют на *резисторные, емкостные, индуктивные, трансформаторные*.

К генераторным относятся датчики, использующие эффект наведенной электродвижущей силы. В таких датчиках осуществляется непосредственное преобразование входной величины в выходную. К **генераторным датчикам** относятся *индукционные, пьезоэлектрические, термоэлектрические датчики* и *датчики на основе эффекта Холла*.

В зависимости от входной величины различают датчики *перемещения, угла поворота, момента вращения, размеров, уровня, скорости, ускорения, параметров вибраций, давления, расхода, температуры* и т.д.

Датчики могут быть также разделены на *контактные* и *бесконтактные*.

#### 3.3.2. Параметры и характеристики датчиков

Основная характеристика датчика – **статическая характеристика** (*характеристика управления*), представляющая зависимость выходной величины  $y$  от входной величины  $x$  (рис. 49).



Статическая характеристика может быть линейной и нелинейной. Нелинейность характеристики обусловлена физическими свойствами датчиков: наличием в них насыщения, неоднородности магнитного поля и т.д.

Статическая характеристика ограничивается нижними ( $x_{\min}, y_{\min}$ ) и верхними ( $x_{\max}, y_{\max}$ ) предельными значениями входной и выходной величин. По статической характеристике могут быть определены следующие параметры датчика.

**Чувствительность** датчика представляет отношение приращений выходной и входной величин. Для нелинейной статической характеристики чувствительность является функцией входной величины. При линейной статической характеристике чувствительность имеет постоянное значение.

**Коэффициент преобразования** – это отношение значения выходной величины к соответствующему значению входной величины. У датчиков с линейной характеристикой чувствительность и коэффициент преобразования равны.

**Остаточный сигнал** – значение выходной величины при нулевой входной величине. Остаточный сигнал отрицательно сказывается на точности измерений, так как при этом в зоне малых значений  $x$  падает чувствительность.

**Порог чувствительности** представляет минимальное значение входной величины, вызывающее изменение выходной величины, которое может быть измерено.

**Номинальной характеристикой** датчика называют статическую характеристику, данную в паспорте датчика. Экспериментально снятая характеристика отличается на величину погрешности.

**Абсолютная погрешность** представляет собой разность между номинальным (расчетным) значением выходной величины и полученным (действительным) ее значением (рис. 50)  $\Delta y = y_n - y_d$ .

Точность преобразования датчика характеризуется относительной погрешностью.

**Относительная погрешность** рассчитывается как отношение абсолютной погрешности к номинальному значению выходной величины  $\gamma_0 = \Delta y / y_n$ .

На погрешность оказывают влияние внешние условия эксплуатации: температура, магнитные и электрические поля, влажность, напряжение и частота источника питания, механические и радиационные воздействия и т.д.

Длительность переходного процесса определяет **быстродействие** датчика.

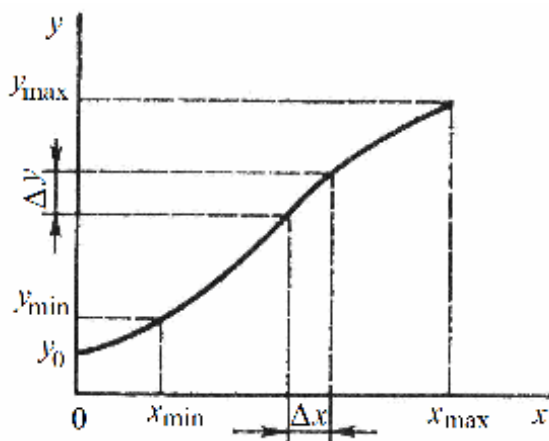


Рис. 49. Статическая характеристика датчика

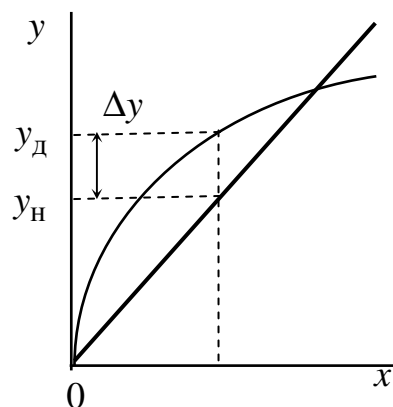


Рис. 50. Паспортная и реальная характеристики датчика

### 3.3.3. Требования, предъявляемые к датчикам

Наряду с высокой чувствительностью и малой погрешностью датчики должны обладать необходимым диапазоном изменения входной величины, возможностью согласования со схемой управления и минимальным обратным воздействием датчика на входную величину. При быстрых изменениях входной величины датчик должен быть малоинерционным.

Кроме этого, одно из основных требований сводится к тому, чтобы параметры и характеристики датчика оставались стабильными во времени и при изменении условий работы (температуры, давления, влажности среды, положения датчика в пространстве и т.д.).

### 3.3.4. Резисторные датчики

**Резисторные датчики** предназначены для измерения перемещения и сил.

Принцип действия резисторных датчиков основан на изменении электрического сопротивления  $R$  при изменении длины  $l$ , сечения  $S$  или удельного сопротивления материала резистора  $\rho$ , так как в общем случае сопротивление зависит от этих параметров:  $R = \rho l / S$ .

В зависимости от вида входной величины **резисторные датчики** делятся на *потенциометрические, тензорезисторные, терморезисторные, магниторезисторные*.

**Потенциометрические датчики** предназначены для измерения угловых или линейных перемещений. С их помощью можно измерить уровень и расход жидкости, силу, размеры и т.д.

В потенциометрических датчиках изменение сопротивления происходит за счет изменения длины проводника.

Потенциометрические датчики представляют собой переменный резистор, подвижный контакт которого перемещается. Величина сопротивления зависит от положения подвижного токосъемного контакта. В потенциометрических датчиках механическое перемещение преобразуется в соответствующее изменение напряжения или тока.

Широкое применение получили **проволочные потенциометрические датчики** непрерывной намотки (рис. 51), состоящие из каркаса, на который намотана обмотка 2, и токосъемного контакта в виде щетки 1.

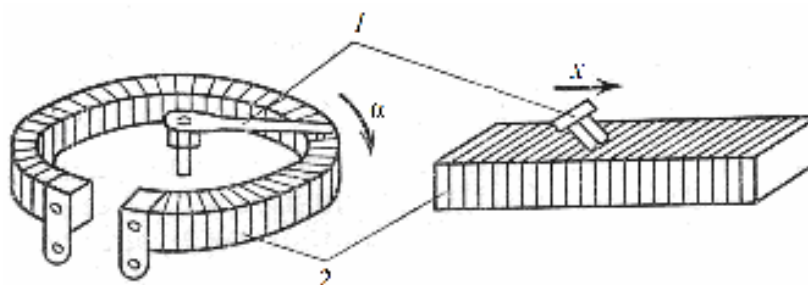


Рис. 51. Конструктивная схема проволочного датчика

Для обмоточного провода используются сплавы с высоким удельным сопротивлением (манганин, константан, нихром). Наилучшей температурной стабильностью обладают резистивные датчики, выполненные из состаренных (подвергнутых циклическому нагреву до 120–130 °С с последующим охлаждением до комнатной температуры) манганиновых сплавов.

Для уменьшения реактивной составляющей намотку проволочных датчиков выполняют на специальных каркасах бифилярно.

Характеристики реальных потенциометрических датчиков имеют ступенчатый характер, так как перемещения щетки с одного витка провода на другой вызывает скачкообразное изменение выходного напряжения.

Для получения нелинейной характеристики датчика, работающего без нагрузки, применяют неоднородную намотку, фигурный каркас, шунтирование участков обмотки и т.д.

Схемы включения датчика приведены на рис. 52.

Наиболее простой является реостатная схема (рис. 52, а) включения датчика. Применяется также параметрическая схема (рис. 52, б). Если входное сопротивление измерительной схемы велико, то выходное напряжение  $U_{\text{вых}}$  зависит от  $\alpha$  или  $x$  и не зависит от  $R_0$ . В реверсив-

ном потенциометрическом датчике (рис. 52, в) имеется отвод от средней точки обмотки, от которой происходит отсчет перемещения щетки. При изменении направления перемещения щетки от средней точки обмотки происходит изменение знака выходного напряжения. В схеме (рис. 52, г) при перемещении левого подвижного контакта вниз правый с помощью механической передачи движется вверх. Чувствительность при этом возрастает в 2 раза.

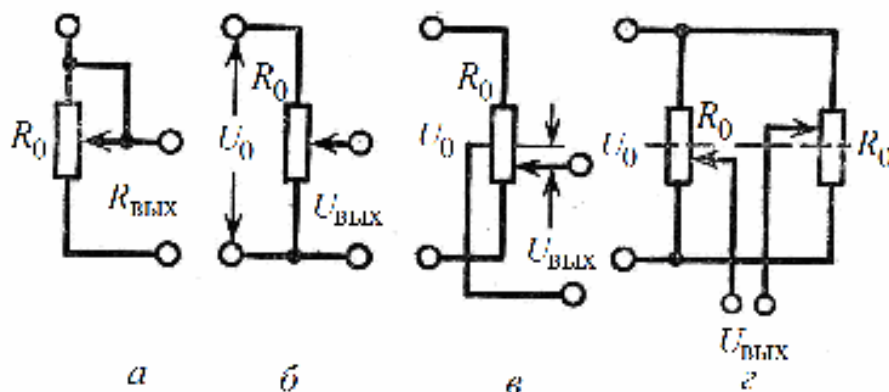


Рис. 52. Схемы включения потенциометрических датчиков

Погрешность работы датчиков зависит от стабильности питающего напряжения, точности изготовления конструктивных деталей, температурной стабильности проводникового материала.

Достоинствами потенциометрических датчиков являются малые масса и габариты, сравнительная простота конструкции, высокая точность работы (погрешность составляет до 0,1 %), возможность питания от источника как постоянного, так и переменного тока. Основной недостаток – наличие подвижного контакта и влияние нагрузки на линейность характеристики.

**Тензорезисторные датчики** предназначены для измерения деформаций, возникающих под действием внешних сил. В тензорезисторных датчиках изменение сопротивления происходит за счет изменения трех величин: длины проводника, сечения и удельного сопротивления.

Принцип действия таких датчиков основан на **явлении тензоэффекта**, заключающегося в изменении активного сопротивления проводниковых и полупроводниковых материалов под воздействием приложенных к ним механических напряжений.

При наличии внешней силы происходит деформация проводника как в направлении действия силы, так и в перпендикулярном направлении. Деформация в направлении действия силы в области упругих деформаций происходит в соответствии с законом Гука  $\delta_l = \Delta l / l = \sigma / E$

(здесь  $\delta_l$  – относительная продольная деформация;  $\sigma$  – механическое напряжение в проводнике;  $l$  – длина проводника;  $\Delta l$  – изменение длины проводника в результате деформации;  $E$  – модуль упругости). Относительная поперечная деформация  $\delta_{\perp} = -\mu\delta_l$  ( $\mu$  – коэффициент Пуассона). Относительное изменение сопротивления проводника  $\delta_R = \Delta R / R = \Delta l / l - \Delta S / S + \Delta \rho / \rho$ .

Тензоэффект различных материалов характеризуется коэффициентом тензочувствительности  $k_T = \delta_R / \delta_l = 1 + 2\mu + m$  [ $m = \Delta \rho / (\delta_l \rho)$ ].

Характеристика управления проволочных резисторов определяется выражением  $\Delta R = k_T R \delta_l$ .

Для увеличения чувствительности тензорезисторного датчика выбираются материалы с высоким коэффициентом тензочувствительности (например, константан), большим удельным сопротивлением и малым поперечным сечением.

**Проводниковые тензорезисторные датчики** могут быть *проволочными и фольговыми*. Вторые имеют большую площадь охлаждения и, следовательно, могут пропускать больший ток (несколько десятков миллиампер).

Проволочные тензорезисторные датчики представляют собой тонкую проволоку (диаметр 0,01–0,05 мм), уложенную зигзагообразно между двумя электроизоляционными подложками, скрепленными клеем или лаком. К концам проволоки присоединяются выводы.

С помощью лака или клея тензодатчик прочно крепится на детали, механическая деформация которой (или сила, действующая на деталь) контролируется.

При растяжении (или сжатии) детали аналогичную деформацию претерпевает и тонкая проволока тензодатчика, что вызывает изменение ее электрического сопротивления. Если проволочный элемент П тензодатчика (рис. 53), наклеенный на деформируемую деталь Д, включить в одно из плеч мостовой схемы, то изменение его сопротивления на  $\Delta R$  при деформации детали силой  $F$  вызовет разбаланс в схеме моста. Измерительный элемент ИЭ в диагонали схемы зафиксирует соответствующий ток небаланса  $i_{\text{нб}}$ . Для компенсации температурной погрешности тензодатчика нередко в другое плечо моста включается идентичный элемент, сопротивление которого остается неизменным, т.к. он крепится на детали, не подверженной деформации.

Фольговые датчики аналогичны проволочным. Фотохимический способ позволяет создать любой рисунок, что является преимуществом фольговых датчиков.

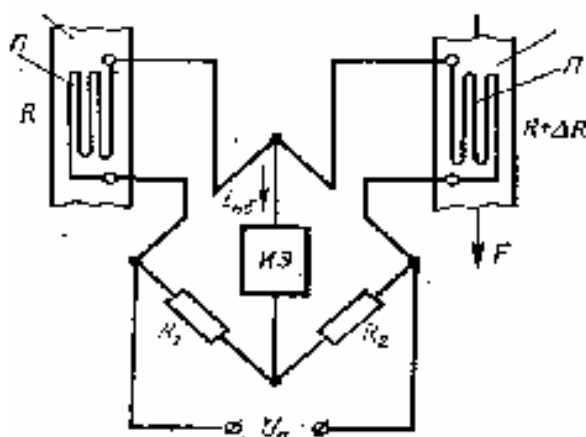


Рис. 53. Схема включения тензодатчика

Применяются также **полупроводниковые тензорезисторные датчики**, основными достоинствами которых являются малые размеры, высокий уровень выходного сигнала, высокий коэффициент тензочувствительности. Полупроводниковые тензорезисторы имеют в десятки раз большую тензочувствительность по сравнению с обычными. Тензорезисторы *n*-типа имеют отрицательный коэффициент тензочувствительности, а *p*-типа – положительный.

Недостаток таких датчиков – разброс параметров, достигающий 20 % в одной партии, достоинство – термическая стабильность.

Тензорезисторы широко используются в тензометрировании.

**Терморезисторные датчики** предназначены для измерения температуры деталей машин, приборов, механизмов.

Принцип действия таких датчиков основан на изменении электрического сопротивления проводниковых и полупроводниковых материалов при изменении их температуры. В терморезисторных датчиках используются материалы, обладающие большим и стабильным температурным коэффициентом сопротивления и линейной зависимостью сопротивления от температуры.

**Проводниковые терморезисторные датчики** изготавливаются из платины, меди, никеля, железа, вольфрама и др. материалов.

Зависимость сопротивления от температуры с некоторым приближением имеет вид  $R = R_0(1 + \alpha\theta)$  ( $R_0$  – сопротивление проводника при температуре 0 °С;  $\theta$  – превышение температуры проводника относительно 0 °С;  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления).

На точность работы влияют изменение свойств материалов со временем, нестабильность сопротивления токоподводящих проводов, дополнительный нагрев датчиков при прохождении по ним тока. Погрешность измерений составляет 0,5–1 %. Для увеличения чувствительности

выбираются материалы с большим температурным коэффициентом сопротивления.

Конструктивно терморезисторный датчик представляет собой бифилярную обмотку из тонкой проволоки, размещенную на изоляционном каркасе, вставленную в специальный чехол с выводами.

Как элементы различных датчиков широкое распространение получили **полупроводниковые термосопротивления**, имеющие сильно выраженную зависимость сопротивления от температуры.

Среди полупроводниковых терморезисторов различают **позисторы** и **термисторы**. Первые из них характеризуются положительным температурным коэффициентом сопротивления, вторые – значительным отрицательным. Полупроводниковые терморезисторы, наряду с более высокой чувствительностью по сравнению с обычными, обладают такими недостатками, как нелинейность и узкий температурный диапазон. Максимальная рабочая температура полупроводниковых терморезисторов не может превышать 300 °С, в то время как для вольфрамовых терморезисторов она может достигать 3000 °С.

Сопротивление термистора уменьшается с повышением температуры по экспоненциальному закону  $R_T = R_0 e^{-\alpha\theta} = R_0 \left( 1 - \alpha\theta + \frac{\alpha^2\theta^2}{2} - \dots \right)$ . Здесь  $R_0$  – сопротивление термистора при температуре 0 °С;  $\theta$  – превышение температуры термистора относительно 0 °С;  $\alpha$  – температурный коэффициент термистора; обычно  $\alpha = (0,03 - 0,06)$  град<sup>-1</sup>.

Характеристика термистора представлена на рис. 54.

Конструктивно термисторы представляют из себя тело дисковой, шаровой или других форм с металлическими выводами, покрытое слоем лака или стекла или помещенное в герметичный стеклянный баллон для защиты от влаги.

Термисторы изготавливают прессованием и отжигом измельченных оксидов, сульфидов, нитридов или карбидов металлов.

Чувствительность термисторов в 5–30 раз выше, чем чувствительность проводниковых терморезисторов. Термисторы находят применение для ограничения пусковых токов электродвигателей.

Способность термисторов существенно изменять свое сопротивление при изменении условий охлаждения определила их применение в качестве датчиков изменения температуры окружающей среды. Если термистор поместить в поток жидкости или газа, то температура его нагрева протекающим по нему током будет зависеть от скорости этого потока. Следовательно, термистор можно использовать в качестве датчика скорости движения жидкости или газа, а при соответствующей схеме

включения нескольких термисторов – в качестве датчика направления потока.

Термистор может быть и датчиком уровня жидкости. Погруженный в жидкость термистор имеет определенную температуру. Если уровень жидкости понизится и термистор окажется в воздухе, то его температура и сопротивление изменятся, так как условия охлаждения будут другими.

Термистор может быть датчиком степени разрежения воздуха (вакуума). С понижением давления воздуха ухудшаются условия передачи тепла от термистора, расположенного в этой среде.

**Магниторезисторные датчики** являются менее распространенными резистивными датчиками.

Их действие основано на эффекте Гаусса (увеличение сопротивления полупроводника при внесении его в магнитное поле): регулируя напряженность магнитного поля, можно управлять сопротивлением резистора.

Такие датчики предназначены для измерения индукции магнитного поля.

Основная характеристика магниторезисторного датчика – зависимость его сопротивления от индукции магнитного поля.

На рис. 55 приведена характеристика датчика, выполненного из антимонида индия (InSb). В интервале малых индукций характеристика нелинейна, а при больших значениях индукции практически линейна.

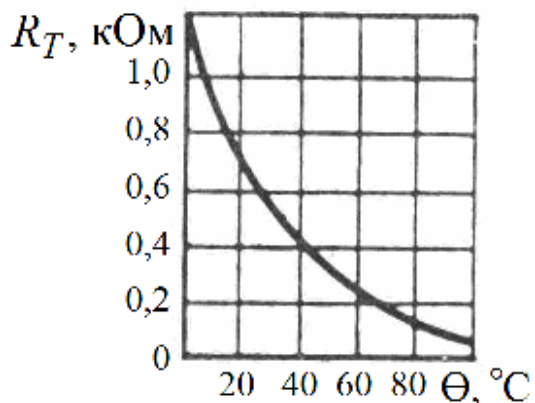


Рис. 54. Характеристика термистора

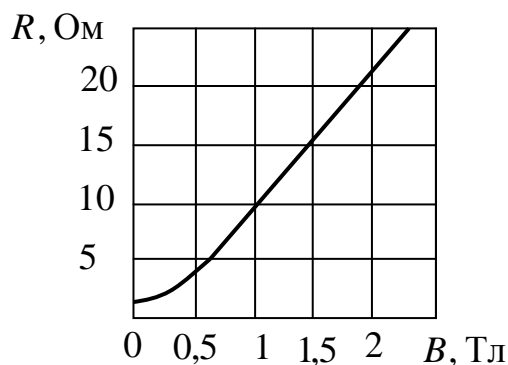


Рис. 55. Характеристика магниторезисторного датчика

В слабых полях (0,3–0,5 Тл) зависимость сопротивления от индукции квадратичная:  $R_B = R_0 + aB^2$  ( $R_B$  – значение активного сопротивления при индукции  $B$ ;  $R_0$  – значение активного сопротивления при индукции  $B = 0$ ;  $a$  – коэффициент пропорциональности).



При больших индукциях зависимость становится линейной:  $R_B = bB \pm R'_0$  ( $b$  – коэффициент пропорциональности;  $R'_0$  – значение сопротивления на оси ординат, соответствующее продолжению прямой линии).

Квадратичная зависимость создает при некоторых применениях затруднения, поэтому используют поле предварительного смещения с индукцией 0,3–0,5 Тл.

### 3.3.5. Емкостные датчики

**Емкостные датчики** служат для измерения перемещений, размеров деталей, уровня жидкости, механических напряжений, температуры.

Принцип действия емкостных датчиков основан на изменении емкости конденсатора под воздействием входной величины.

Такие датчики нашли широкое применение в схемах автоматики и измерительных приборов благодаря высокой чувствительности, малым габаритам, массе и инерционности, простой технологии изготовления.

Недостатки емкостных датчиков: большое внутреннее емкостное сопротивление, что делает эти датчики маломощными; необходимость работы на высокой частоте источника питания; сильное влияние паразитных емкостей на точность работы датчика; влияние посторонних электрических полей, изменения температуры и влажности среды. Недостатки емкостных датчиков вызваны тем, что при реальных технически целесообразных размерах удается получить небольшие их собственные емкости (10–50 пФ).

На рис. 56 приведено устройство емкостных датчиков и графики изменения их емкости при изменении площади перекрытия пластин (электродов) в результате смещения одной пластины конденсатора относительно другой (рис. 56, а); при изменении диэлектрической проницаемости среды (рис. 56, б) и изменении воздушного зазора между пластинами конденсатора (рис. 56, в).

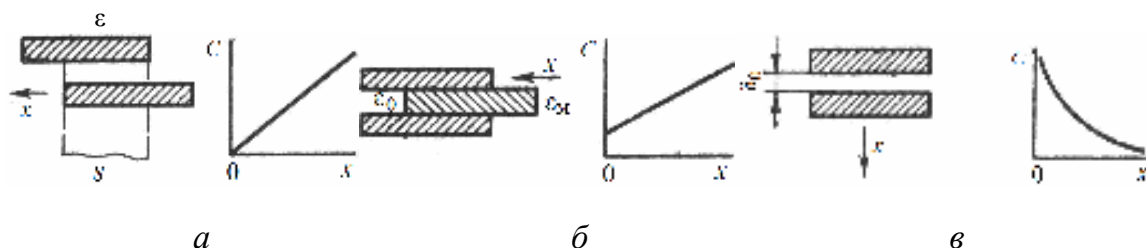


Рис. 56. Емкостные датчики

Конструктивно емкостной датчик представляет собой плоскопараллельный или цилиндрический конденсатор переменной емкости. Одна из пластин неподвижна и механически соединена с корпусом контролируемого устройства, а вторая подвижна и соединяется с деталью, перемещение которой измеряется.

Датчики с изменением величины воздушного зазора и площади перекрытия используются обычно для измерения линейных и угловых перемещений, размеров деталей, а датчики с изменением диэлектрической проницаемости – для измерения уровней непроводящих жидкостей.

Емкостной датчик перемещения с изменяющимся воздушным зазором имеет характеристику управления, описываемую выражением

$$C_x = \frac{\epsilon S}{\delta} = \frac{\epsilon S}{\delta_0 + x} \quad (\delta_0 - \text{начальный зазор; } S - \text{площадь пластины конденсатора}).$$

Такие датчики применяют в случае небольшого диапазона изменения контролируемой величины, так как чувствительность зависит от измеряемого перемещения.

Емкостной датчик перемещения с переменной площадью перекрытия имеет характеристику управления, определяемую выражением

$$C_x = \epsilon a x / \delta_0 \quad (a - \text{ширина пластин конденсатора}).$$

Емкостной датчик перемещения с переменной площадью перекрытия используется, в частности, для измерения угла поворота вала. Достоинством таких датчиков является возможность соответствующим выбором формы подвижной и неподвижной пластин получить заданную зависимость между изменением емкости и входным угловым или линейным перемещением.

Для повышения чувствительности емкостных датчиков применяют дифференциальные конструкции конденсаторных систем. На рис. 57 дан пример такой конструкции, использованной для построения датчика угловых перемещений. При повороте средней пластины 3 и увеличении угла  $\alpha$  емкость с пластины 3 на пластину 1 увеличивается (площадь  $S_1$ ), а емкость с пластины 3 на пластину 2 уменьшается (площадь  $S_2$ ). Если эти емкости ( $C_1$  и  $C_2$ ) включить в мостовую схему, включающую также постоянные емкости  $C_3$  и  $C_4$  и питаемую от источника высокой частоты  $U_{в.ч.}$ , то неравенство  $C_1 \neq C_2$  приведет к появлению в диагонали моста тока небаланса, измеряемого элементом ИЭ. Выбором формы пластин 1, 2 и 3 можно добиться любого вида зависимости емкостей  $C_1$  и  $C_2$  от угла поворота  $\alpha$ . Расстояние между пластинами измеряется десятymi долями миллиметра. Такие датчики позволяют измерять весьма малые углы, соответствующие линейным перемещениям по наружной окружности до  $10^{-5}$  см.

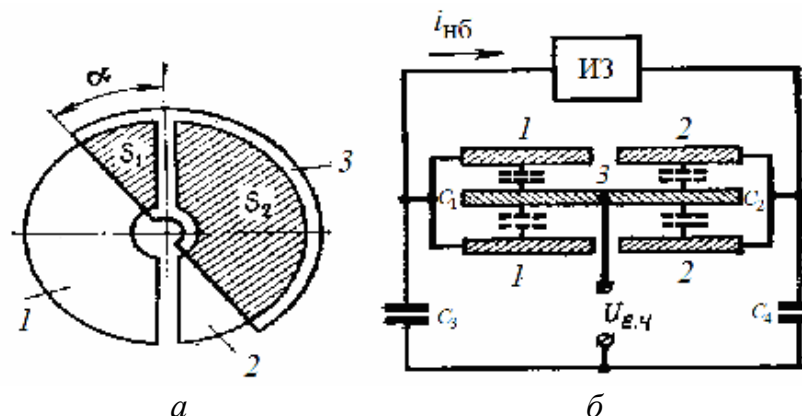


Рис. 57. Дифференциальный датчик

На работу емкостных датчиков оказывают влияние колебания температуры и влажности окружающей среды. Для устранения этого влияния применяют сплавы с малым температурным коэффициентом линейного расширения и герметизацию датчика.

### 3.3.6. Индуктивные датчики

**Индуктивные датчики** служат для измерения перемещений и сил. Принцип действия таких датчиков основан на изменении индуктивности обмотки, включенной в цепь переменного тока.

Достоинствами индуктивных датчиков являются большие надежность и срок службы ввиду отсутствия скользящих контактов. К недостаткам относятся наличие остаточного сигнала, чувствительность к изменению напряжения питания, наличие фазовых искажений и гальванической связи выходной цепи с цепью питания. Работают такие датчики только на переменном токе.

Индуктивность обмотки зависит от величины сопротивления немагнитного зазора и сопротивления магнитопровода.

Сопротивление немагнитного зазора может изменяться за счет изменения величины зазора или его площади.

На рис. 58 представлен датчик с изменяемым зазором. Датчик состоит из магнитопровода 1 с обмоткой возбуждения 2 и подвижного якоря 3. При перемещении якоря изменяется сопротивление магнитной цепи и индуктивность обмотки.

Если пренебречь магнитным сопротивлением стали, потоками рассеяния и выпучивания, то индуктивность обмотки  $L = \Lambda \delta w^2 = \mu_0 S w^2 / (2\delta)$  (обозначения соответствуют принятым в разд. 2.5 и 2.6).

Выходное напряжение датчика (индуктивное сопротивление обмотки много больше активного)  $U_{\text{вых}} = 2UR_H \delta / (\omega \mu_0 S_M w^2)$ .

Зависимость выходного напряжения от зазора дана на рис. 59. Реальная характеристика индуктивного датчика не проходит через начало координат. Это объясняется тем, что при  $\delta = 0$  сопротивление цепи имеет конечное значение и индуктивное сопротивление обмотки не равно  $\infty$ .

На рис. 60 показано применение индуктивного датчика для контроля давления  $P$  в закрытом резервуаре. Увеличение давления приводит к перемещению вниз якоря  $Я$  и уменьшению воздушного зазора  $\delta$  в магнитной системе датчика. Изменение воздушного зазора в магнитной системе, вызванное изменением давления  $P$ , фиксируется измерительным элементом ИЭ через соответствующую величину тока, частота которого обычно лежит в пределах 100–3000 Гц.

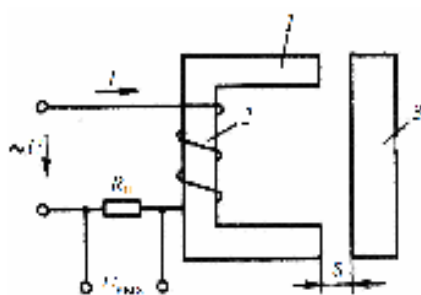


Рис. 58. Индуктивный датчик

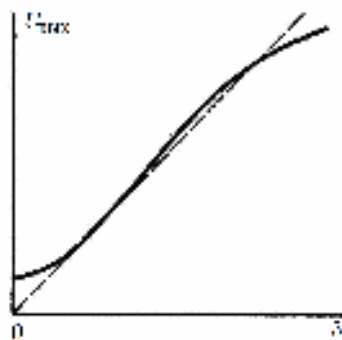


Рис. 59. Характеристика датчика

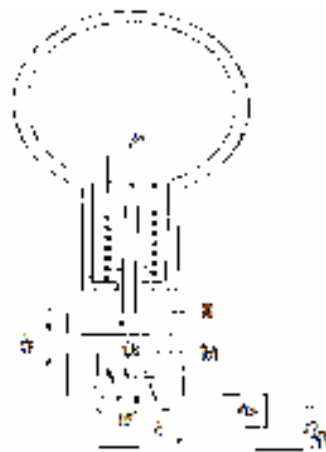


Рис. 60. Применение датчика

Индуктивные датчики такого типа имеют следующие недостатки: фаза выходного напряжения зависит от величины воздушного зазора; на якорь действует значительная электромагнитная сила; характеристика управления расположена только в первом квадранте.

Более широкое применение получили **реверсивные датчики**, имеющие лучшие характеристики. Дифференциальный реверсивный датчик содержит две совершенно одинаковые и симметрично расположенные электромагнитные системы.

В нейтральном положении якоря индуктивности обмоток равны. Токи обмоток равны по величине и имеют противоположное направление, в результате чего ток нагрузки и выходное напряжение равны нулю. С увеличением перемещения якоря от нейтрального положения выходное напряжение растет по закону, близкому к линейному, при значи-

тельных перемещениях происходит замедление роста выходного напряжения, так как при больших зазорах одна из индуктивностей меняется мало. Изменение знака выходного напряжения при изменении направления перемещения означает изменение фазы выходного напряжения на  $180^\circ$ .

Реверсивный датчик также может быть включен по мостовой схеме.

Реверсивные датчики имеют следующие преимущества перед нереверсивными: линейная часть выходной характеристики имеет большую протяженность; электромагнитное усилие, действующее на якорь, значительно меньше (это объясняется частичной компенсацией электромагнитных усилий).

Для точного измерения больших перемещений применяются *линейные и круговые датчики с зубчатыми сердечниками*, позволяющие измерять также линейное и угловое перемещение путем счета периодов изменения выходного сигнала в процессе движения подвижной части.

Индуктивные *датчики с подвижными экранами* измеряют механические перемещения. При перемещении экрана в таких датчиках меняется реактивное сопротивление немагнитного зазора, а следовательно и индуктивное сопротивление обмотки.

Индуктивные *магнитоупругие датчики* предназначены для измерения значительных механических сил. Принцип действия таких датчиков основан на магнитоупругости (изменении проницаемости ферромагнитных тел под воздействием механических сил). Хорошими магнитоупругими свойствами обладают железоникелевые и железокобальтовые сплавы.

При изменении силы, действующей на магнитопровод, меняется полное электрическое сопротивление обмотки и соответственно напряжение и ток в схеме.

### 3.3.7. Трансформаторные датчики

**Трансформаторные датчики** применяются для измерения механических перемещений и сил. Они представляют собой трансформаторные устройства с переменной магнитной связью между первичной и вторичной обмотками.

Достоинствами трансформаторных датчиков являются отсутствие гальванической связи между источником питания и цепью нагрузки и скользящего контакта между подвижной и неподвижной частями, а также простая конструкция и технология изготовления.

К недостаткам датчиков относятся наличие остаточного сигнала и подверженность помехам со стороны электромагнитных полей.

По конструктивному исполнению трансформаторные датчики делятся на *датчики с перемещающимся якорем, с перемещающимся электромагнитным экраном (короткозамкнутым витком), с перемещающейся обмоткой* (рис. 61).

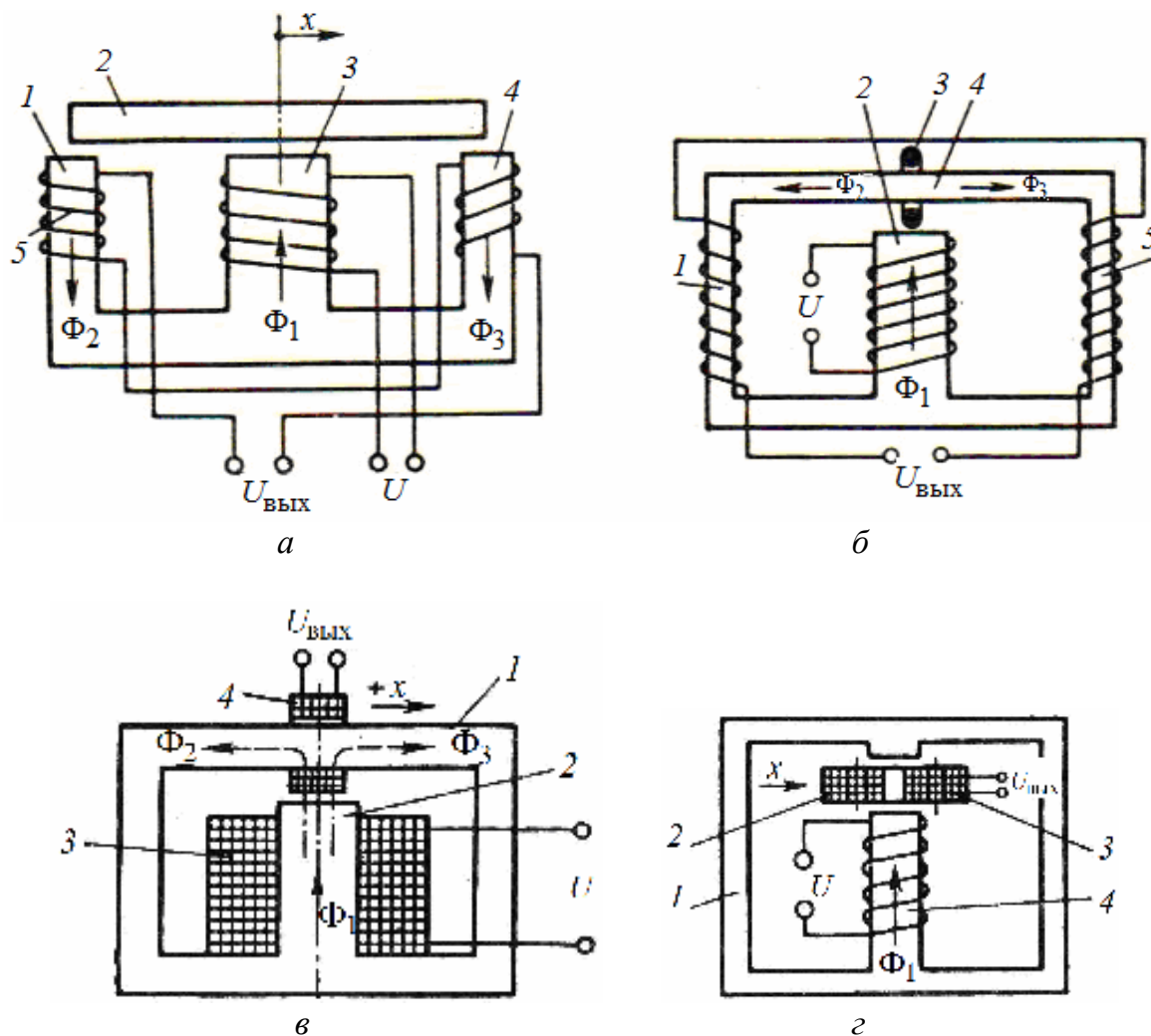


Рис. 61. Трансформаторные датчики

**Трансформаторные датчики** с перемещающимся якорем (рис. 61, а) не имеют подвижной обмотки. При смещении якоря происходит перераспределение магнитных потоков в крайних стержнях, так как меняется проводимость воздушных зазоров и на выходе появляется сигнал, зависящий от смещения якоря; фаза сигнала соответствует направлению смещения.

На якорь датчика действует электромагнитная сила, которая нагружает подшипники и, кроме того, стремится вернуть якорь в исходное положение.

Магнитная система датчика с перемещающимся короткозамкнутым витком (рис. 61, б) имеет зазор между средним стержнем 2 и горизонтальным магнитопроводом 4. Короткозамкнутый виток 3 охватывает магнитопровод и может свободно перемещаться вдоль него. Первичная обмотка надета на средний стержень, а последовательно и встречно включенные сигнальные обмотки расположены на боковых стержнях 1 и 5. Первичная обмотка создает поток  $\dot{\Phi}_1$ , разветвляющийся на потоки  $\dot{\Phi}_2$  и  $\dot{\Phi}_3$ . При отклонении витка от симметричного положения происходит перераспределение потоков  $\dot{\Phi}_2$  и  $\dot{\Phi}_3$ , в результате которого образуется выходной сигнал, возрастающий по мере удаления витка от нейтрального положения.

В датчиках с короткозамкнутым витком возникает электродинамическая сила, достигающая существенной величины. Кроме того, в таких датчиках имеются значительные температурные и фазовые погрешности.

Трансформаторные датчики с перемещающейся обмоткой (рис. 61, в и г) имеют сравнительно высокую чувствительность, малые остаточные сигналы, практически не имеют электромагнитной силы, действующей на подвижную обмотку, и не чувствительны к поперечным колебаниям обмотки.

Магнитная система датчика со вторичной обмоткой, перемещающейся вдоль магнитопровода (рис. 61, в), имеет воздушный зазор между вертикальным сердечником 2 и горизонтальным 1. Последний охватывает вторичная обмотка 4. Первичная обмотка 3 расположена на среднем сердечнике. Взаимная индуктивность между обмотками изменяется при перемещении вторичной обмотки в магнитном поле, создаваемом первичной. Выходной сигнал зависит от перемещения.

Магнитная система датчика с обмоткой, перемещающейся в воздушном зазоре (рис. 61, г), состоит из замкнутого магнитопровода 1 с одним воздушным зазором и надетой на средний стержень 4 первичной обмотки. В воздушном зазоре перемещается вторичная обмотка, состоящая из двух одинаковых катушек 2 и 3, включенных встречно. При перемещении вторичной обмотки значения электродвижущих сил катушек меняются в зависимости от положения обмотки, в результате чего появляется выходной сигнал.

На такой датчик практически не оказывают влияние магнитные поля, так как воздушный зазор шунтирован магнитопроводом. Кроме того, такие датчики проще по конструкции и технологии сборки.

В трансформаторном магнитоупругом датчике изменение магнитной проницаемости при воздействии силы приводит к изменению магнитного потока и электродвижущей силы.

### 3.3.8. Генераторные датчики

**Индукционные датчики** предназначены для измерения линейных и угловых скоростей или перемещений. По принципу действия **индукционные датчики** можно разделить на *датчики со взаимным перемещением обмотки и магнита* и *датчики с изменяющейся величиной поля постоянного магнита*.

В датчиках первой группы индуцированная электродвижущая сила наводится благодаря линейным или угловым перемещениям обмотки в зазоре магнитной системы. При этом в некоторых конструкциях обмотка выполняется неподвижной, а перемещается магнитная система. В датчиках второй группы индуцированная электродвижущая сила наводится в результате изменения магнитного сопротивления цепи при перемещениях подвижной части.

Индукционные датчики скорости в качестве входной величины имеют механическую скорость, а в качестве выходной – электрическое напряжение или электродвижущую силу.

*Датчик с взаимным перемещением обмотки и магнита* представлен на рис. 62. Магнит 4 цилиндрической формы является источником потока, замыкающегося через магнитопровод 1, который имеет форму полого цилиндра, и воздушный зазор. В воздушном зазоре вдоль оси перемещается сигнальная обмотка 2, выполненная в виде кольца. Обмотка залита эпоксидным компаундом 3, что обеспечивает ей прочность и крепление с другими подвижными деталями.

При перемещении сигнальной обмотки в ней наводится электродвижущая сила  $e = \pi B_{\delta} w d_{cp} V$  ( $V$  – линейная скорость перемещения обмотки).

Датчик угловой скорости, изображенный на рис. 63, относится по принципу действия ко второй группе. Он содержит постоянный магнит 1, жестко связанный с магнитопроводом 2, на стержнях которого расположена обмотка, состоящая из двух катушек 3, соединенных последовательно и согласно. При вращении зубчатого колеса 4 периодически меняются полная проводимость системы и магнитный поток, пронизывающий обмотку, в результате чего в ней наводится электродвижущая сила, пропорциональная скорости вращения колеса.

Погрешность датчиков первой группы составляет 0,02–0,01 %. У датчиков второй группы линейность зависит от магнитных характеристик материалов магнитной цепи. Поскольку эти характеристики обычно нелинейные, датчики второй группы имеют большую погрешность.



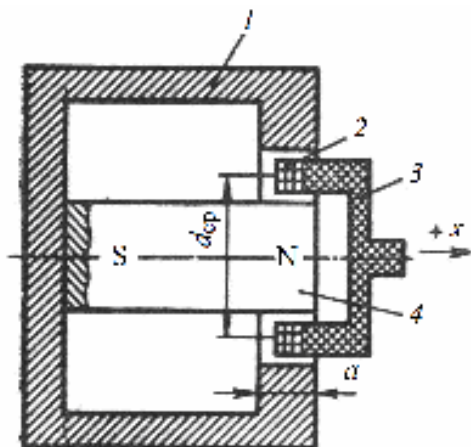


Рис. 62. Индукционный датчик скорости

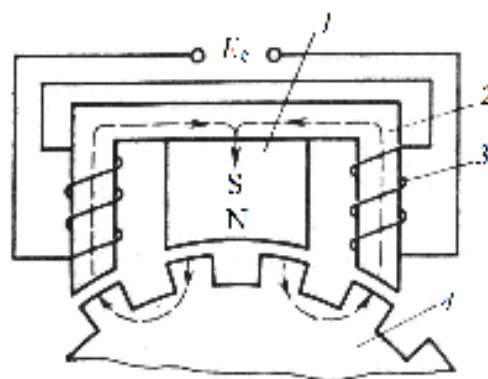


Рис. 63. Индукционный датчик угловой скорости

Выходной сигнал датчика может быть включен через выпрямительный мост на измерительный прибор постоянного тока. Если на выходе обмотки подключить счетчик импульсов, то по его показаниям можно определить количество прошедших деталей.

Пьезоэлектрические датчики широко применяются для измерения вибраций, переменных усилий и в ультразвуковых генераторах.

Принцип действия таких датчиков основан на использовании пьезоэлектрического эффекта, которым обладают некоторые кристаллы. При воздействии механической силы на кристаллы в них происходит разделение (смещение) зарядов — одна область в кристалле заряжается положительно, а другая — отрицательно.

Пьезоэффект наиболее сильно выражен у кварца, турмалина, сегнетоэлектриков.

Различают прямой и обратный пьезоэффекты. Прямой пьезоэффект заключается в возникновении электрических зарядов на гранях кристалла под действием механических напряжений. Обратный пьезоэффект состоит в изменении геометрических размеров кристалла под действием электрического поля. Различают также продольный и поперечный пьезоэффекты, в зависимости от направления действия силы.

Пьезоэлектрические датчики непригодны для контроля постоянных или медленно изменяющихся усилий, так как заряд, возникающий на гранях пьезоэлемента, имеет малую величину. Кроме того, происходит его утечка через изоляцию. Из пьезокристаллов выполняют датчики динамических величин. Кварцевые датчики являются наиболее подходящими для работы в расширенном диапазоне температур при больших значениях преобразуемых усилий с точки зрения точности и стабильности характеристик.

Параллельное электрическое соединение пьезодатчиков, подвергающихся воздействию одной и той же силы (датчики располагаются столбом – один над другим), позволяет увеличить их чувствительность.

**Термоэлектрические датчики** применяются для измерения температур. Специальные термоэлектрические датчики используются для измерения тепловой радиации, температуры нагревателей в термоанемометрах и вакуумметрах.

Принцип действия термоэлектрических датчиков основан на **явлении термоэлектричества**.

Явление термоэлектричества заключается в возникновении термоэлектродвижущей силы в цепи (термопаре), составленной из двух различных проводников или полупроводников (термоэлектродов)  $A$  и  $B$  (рис. 64,  $a$ ), соединенных между собой концами (спаями), причем температуры мест соединения отличны друг от друга.

Величина термоэлектродвижущей силы зависит только от материала проводников и от температуры спаев и не зависит от распределения температуры между спаями. Если один спай (рабочий) поместить в среду с температурой  $\theta_1$ , подлежащей измерению, а температуру  $\theta_0$  других, холодных спаев, поддерживать постоянной, то  $E_{AB}(\theta_1, \theta_0) = f(\theta_1) - C = f_1(\theta_1)$ , независимо от того, каким образом произведено соединение термоэлектродов (пайкой, сваркой и т.д.).

Характеристика термопары представлена на рис. 64,  $b$ .

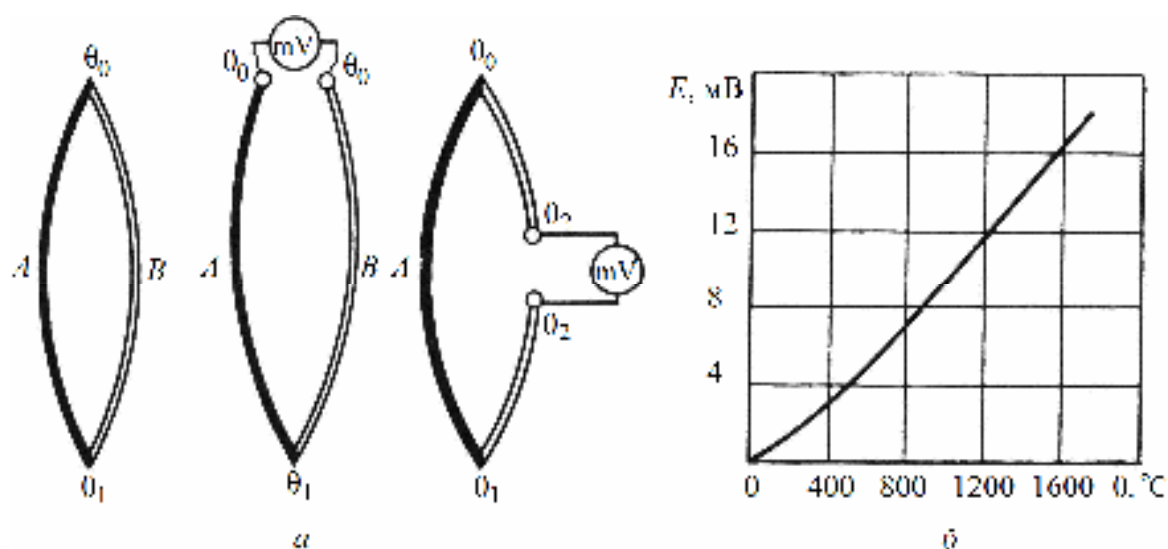


Рис. 64. Термопара и ее характеристика

Материалы для термоэлектродов должны отвечать следующим требованиям: иметь линейную зависимость термоэлектродвижущей силы от температуры, неизменность физических свойств при эксплуата-

ции, высокую электропроводность, малый температурный коэффициент сопротивления.

При конструировании термопар стремятся сочетать термоэлектроды, один из которых развивает с платиной положительную, а другой – отрицательную термоэлектродвижущую силу. Положительную термоэлектродвижущую силу имеют материалы, у которых в паре с платиной ток в горячем спае течет от платины (например, свинец, олово, магний), а отрицательную – материалы, у которых ток течет к платине (например, никель).

Термопары из благородных материалов отличаются стабильностью характеристик и устойчивостью к влиянию внешней среды. Недостаток их – небольшое значение термоэлектродвижущей силы.

Для повышения выходной термоэлектродвижущей силы используются несколько термопар, образующих термобатарею.

**Датчики Холла** используются для измерения магнитных, электрических и неэлектрических величин.

Принцип действия таких датчиков основан на *эффekte Холла*.

Эффект Холла возникает в пластине с током, помещенной в магнитное поле, и выражается в смещении носителей электричества к краям пластины, между которыми возникает электродвижущая сила Холла. Обычно длина пластины значительно превышает ее ширину, а ширина – толщину пластины.

Датчики Холла с пластинами из металлов непригодны для практического применения из-за малой электродвижущей силы, соизмеримой с теми, которые наводятся посторонними электромагнитными полями (помехи). Практическое применение нашли датчики Холла с пластинами из полупроводниковых материалов. Материалами для изготовления датчиков Холла являются германий, кремний, антимонид индия, арсенид галлия и др.

Значение выходного напряжения для прямоугольной полупроводниковой пластины, расположенной в однородном магнитном поле,

$$U_{\text{вых}} = k_x I_{\text{вх}} \frac{B}{d} f(l/b, B) \quad (k_x - \text{коэффициент Холла; } I_{\text{вх}} - \text{ток в пластине; } B - \text{нормальная составляющая вектора магнитной индукции магнитного поля; } l, b, d - \text{соответственно длина, ширина и толщина пластины}).$$

Монокристаллические датчики изготавливаются в виде пластинок (толщина более 0,1 мм), которые с целью увеличения механической прочности покрываются синтетическими смолами с хорошей теплопроводностью.

Пленочные датчики изготавливают распылением материала по поверхности изолирующей подложки из слюды с последующей термообработкой. Толщина пленок – 0,002–0,05 мм. Для электрической изоляции пленки и ее защиты от механических повреждений применяют лаковые покрытия.

Датчики Холла позволяют измерять распределение магнитных полей в пространстве; проводить измерения в глубоких отверстиях и малых зазорах; имеют линейную зависимость выходного напряжения от управляющих величин; имеют малые размеры; широкий частотный диапазон для переменных величин тока или индукции и практически неограниченный срок службы.

Недостатками являются: относительно сложная технология; большой разброс параметров в пределах одной партии; зависимость коэффициента Холла от температуры.

### 3.4. Автоматические выключатели

#### 3.4.1. Общие сведения об автоматических выключателях

**Автоматический воздушный выключатель (автомат)** – электрический аппарат, предназначенный для автоматического отключения электрической цепи при перегрузках, коротком замыкании, чрезмерном понижении напряжения питания, изменении направления мощности и т.д., а также для редких включений и отключений вручную номинальных токов нагрузки.

**Основными параметрами** автоматов являются: *собственное время* (время от момента достижения током величины тока срабатывания до начала расхождения контактов) и *полное время отключения, номинальный длительный ток, номинальное напряжение, предельный ток отключения*.

Собственное время отключения обыкновенного автомата – 0,01 с. Kontakтами такого автомата отключается ток установившегося короткого замыкания. В быстродействующих автоматах собственное время отключения сокращается до 0,002–0,008 с. Такой автомат обеспечивает токоограничение.

К автоматам предъявляются следующие **требования**: токоведущая цепь автомата должна пропускать номинальный ток в течение сколь угодно длительного времени, автомат должен обеспечивать многократное отключение предельных токов короткого замыкания, автоматы должны иметь малое время отключения и обеспечивать селективность.

В зависимости от вида воздействующей величины автоматы делятся на *максимальные автоматы по току, минимальные автоматы по току, минимальные автоматы по напряжению, автоматы обратного тока, максимальные автоматы, работающие по производной тока, поляризованные максимальные автоматы* (отключают цепь при нарастании тока в одном – прямом направлении) и *неполяризованные*, реагирующие на возрастание тока в любом направлении. *Универсальные автоматы* обеспечивают комбинированную защиту – максимальную по току и минимальную по напряжению. *Установочные автоматы* закрыты пластмассовым кожухом и практически не выбрасывают дугу.

### 3.4.2. Конструкции и типы автоматических выключателей

Основными узлами автомата являются: *токоведущая цепь, дугогасительная система, привод автомата, механизм автомата, механизм свободного расцепления и элементы защиты – расцепители*.

В автомате на ток более 200 А (рис. 65) токоведущая цепь имеет главные 3 и дугогасительные 1 контакты. При номинальных токах до 200 А применяется одна пара контактов, облицованных металлокерамикой для увеличения дугостойкости. В автоматах на большие токи применяются несколько параллельных пар главных контактов.

С целью уменьшения собственного времени в быстродействующих автоматах применяются торцевые контакты, имеющие малый провал.

Во избежание приваривания контактов применяется электродинамическая компенсация. При протекании тока в дугогасительном контуре на проводник АВ, несущий неподвижный дугогасительный контакт, действует электродинамическое усилие, увеличивающее нажатие контактов.

Включение автомата может производиться вручную рукояткой 12 или электромагнитом 4. Ручные приводы применяются при номинальных токах до 200 А. При токах до 1 кА применяются электромагнитные приводы. Недостатком электромагнитного привода являются большие скорости движения и удары в механизме, которые могут приводить к вибрации контактов.

В автоматах на токи 1500 А и выше желательно применение электродвигательного привода.

Звенья 6, 7 и упор 13 образуют механизм свободного расцепления. Функции этого механизма следующие: передача движения от привода к контактам и удержание их во включенном положении, освобождение контактов при отключении, сообщение контактам скорости, необходи-

мой для гашения дуги, фиксация контактов в отключенном положении и подготовка автомата для нового включения.

Отключение автомата может производиться рукояткой 12 или с помощью тепловых и электромагнитных расцепителей 5, 8, 10, 11. Наиболее распространены максимальные расцепители, в которых широко используются электромагнитные системы и тепловые системы с биметаллической пластиной. Электромагнитный расцепитель 8 прост по конструкции, обладает высокой электродинамической и термической стойкостью, а также стойкостью к механическим воздействиям. Расцепление происходит за счет удара, в котором основную роль играет кинетическая энергия якоря, накопленная при его движении. Для создания выдержек времени между электромагнитом и механизмом свободного расцепления ставятся устройства задержки. Наиболее просто зависящая от тока выдержка времени получается с помощью тепловых расцепителей, аналогичных по конструкции тепловым реле. Однако такие расцепители имеют ряд недостатков: слабая термическая стойкость требует высокого быстродействия при отключении больших токов, выдержка времени зависит от температуры окружающей среды, малая термическая стойкость тепловых расцепителей определяет малую допустимую длительность короткого замыкания, что затрудняет получение необходимой селективности.

Более совершенной является защита с помощью полупроводникового расцепителя.

Для дистанционного отключения автомата устанавливается независимый электромагнитный расцепитель 11. Минимальный расцепитель 10 выполняется также электромагнитного типа. Необходимая скорость расхождения контактов обеспечивается пружиной 9.

Гашение дуги происходит в камере 2. В установочных и универсальных автоматах применяется полужакрытое исполнение дугогасительного устройства, а в автоматах на большие предельные токи (100 кА и выше) или большие напряжения (выше 1000 В) – открытое исполнение с большой зоной выброса горячих и ионизированных газов. В полужакрытом исполнении автомат закрыт изоляционным кожухом, имеющим отверстия для выхода горячих газов.

В установочных и универсальных автоматах массового применения используется деионная дугогасительная решетка из стальных пластин. При больших токах применяются лабиринтно-щелевые камеры и камеры с прямой продольной щелью.

На рис. 66 приведена схема быстродействующего автомата, основанного на индукционно-динамическом принципе. Аппарат должен автоматически отключать контактами К цепь тока при недопустимо высо-

ких значениях. Ток  $I_1$ , протекая по неподвижной обмотке 7, создает поток  $\Phi_1$ . При нарастании  $I_1$  поток  $\Phi_1$  изменяется во времени и наводит ток  $I_2$  противоположного направления в диске 8. Взаимодействие токов  $I_1$  и  $I_2$  приводит к возникновению электродинамической силы отталкивания  $F$ , которая перемещает подвижную систему аппарата вправо. Контакты К при этом разрывают цепь аварийного тока  $I_1$ .

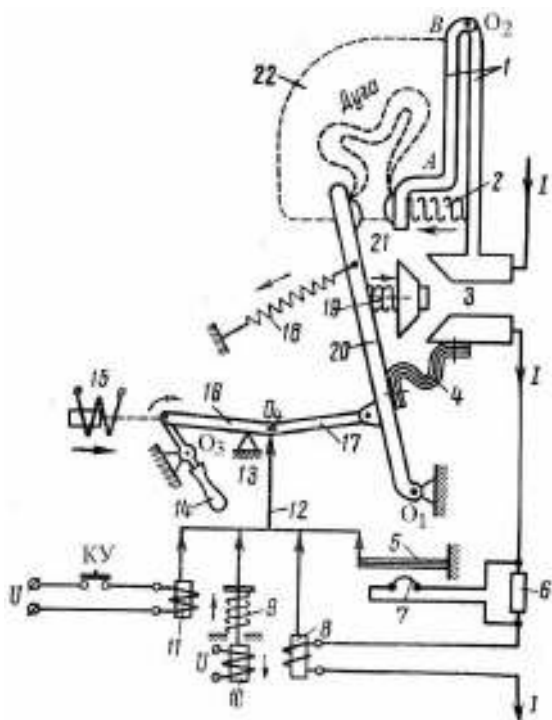


Рис. 65. Автоматический выключатель

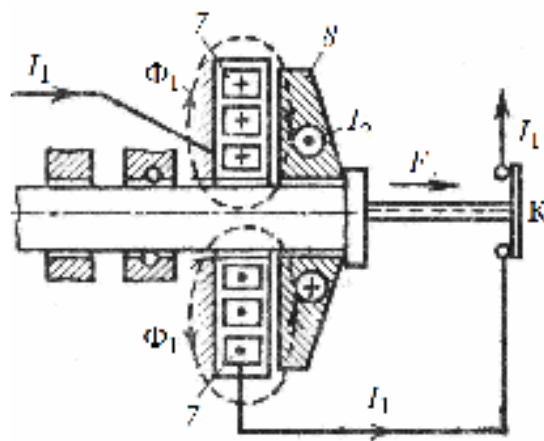


Рис. 66. Быстродействующий автоматический выключатель

### 3.4.3. Выбор автоматических выключателей

Номинальные значения напряжения  $U_{\text{АН}}$  и тока автомата  $I_{\text{АН}}$ , тока нагрузки  $I_{\text{НН}}$  и напряжения сети  $U_{\text{СН}}$  должны удовлетворять соотношениям  $U_{\text{АН}} \geq U_{\text{СН}}$ ,  $I_{\text{АН}} \geq I_{\text{НН}}$ . Для автомата защиты двигателя, работающего в повторно-кратковременном режиме, номинальный ток электромагнитного расцепителя принимается равным току двигателя в этом режиме. Для автоматов защиты двигателей с короткозамкнутым ротором ток уставки электромагнитного расцепителя

$$I_{\text{уст,эм}} \geq (1,5 - 1,8) I_{\text{п}}.$$

Для двигателя с фазным ротором

$$I_{\text{уст,эм}} \geq (2,5 - 3) I_{\text{Дн}}.$$

Для группы короткозамкнутых двигателей

$$I_{уст,эм} \geq (1,5 - 1,8)[\sum I_{Дн} + (I_{п} - I_{Дн})'],$$

где разность  $(I_{п} - I_{Дн})'$  берется для двигателей, у которых она наибольшая.

Для группы двигателей с фазным ротором

$$I_{уст,эм} \geq (1,5 - 2)I'_{Дн} + \sum I_{Дн},$$

где  $I'_{Дн}$  – ток двигателя с наибольшим пусковым током.

Для двигателей, работающих в тяжелом или повторно-кратковременном режиме, номинальный ток теплового или комбинированного расцепителя

$$I_{расц,н} \geq 1,5I_{Дн}.$$

Выбор по току короткого замыкания:

- для автоматов с электромагнитным расцепителем

$$I_{КЗ} / I_{уст,эм} \geq 1,25 - 1,4;$$

- для автоматов с комбинированным расцепителем

$$I_{КЗ} / I_{расц,н} \geq 3.$$

Предельный ток отключения автомата  $I_{Аоткл}$  должен быть не менее тока короткого замыкания  $I_{КЗ}$ .

### 3.5. Предохранители

#### 3.5.1. Понятие *предохранитель*

**Предохранитель** – электрический аппарат, предназначенный для защиты электрических цепей от токовых перегрузок и токов короткого замыкания (КЗ).

Основными элементами предохранителя являются плавкая вставка, включаемая последовательно с защищаемой цепью, и дутогасительное устройство.

Процесс срабатывания предохранителя заключается в нагревании вставки до температуры плавления, ее плавлении, возникновении и гашении электрической дуги.

#### 3.5.2. Основная характеристика и параметры предохранителя

**Основная характеристика предохранителя** – *время-токовая характеристика*, представляющая собой зависимость времени плавления вставки от протекающего тока.



На рис. 67 изображены характеристики предохранителя (кривые 1 и 3) и характеристика защищаемого объекта (кривая 2). Если характеристика предохранителя соответствует кривой 1, то он будет перегорать из-за старения при пуске двигателя. Поэтому ток плавления вставки выбирается больше номинального тока нагрузки (кривая 3). В области больших перегрузок (область Б) предохранитель защищает объект, а в области малых (область А) – не защищает.

Ток, при котором плавкая вставка сгорает при достижении установившейся температуры, называется пограничным током  $I_{\text{погр}}$ . Значение пограничного тока выбирается больше номинального, но как можно ближе к нему.

Основным параметром предохранителя при КЗ является предельный ток отключения (ток, который он может отключить при возвращающемся напряжении, равном наибольшему рабочему напряжению).

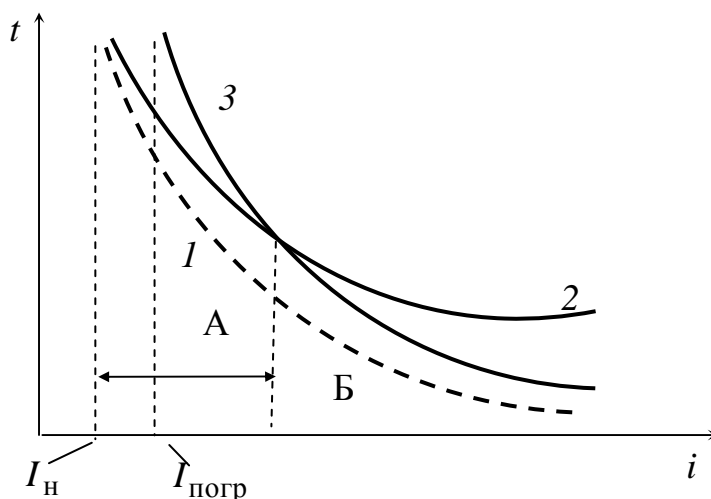


Рис. 67. Характеристики предохранителя и объекта

### 3.5.3. Требования, предъявляемые к предохранителям

К предохранителям предъявляются следующие **требования**: **время срабатывания** предохранителя при коротком замыкании должно быть минимально возможным; предохранители должны работать с **токоограничением**, обеспечивать **селективность защиты**; характеристики предохранителя должны быть стабильными, а технологический разброс параметров не должен нарушать надежности работы; предохранитель должен иметь высокую отключающую способность; конструкция плавкого предохранителя должна обеспечивать возможность быстрой и удобной замены плавкой вставки при ее перегорании.

### 3.5.4. Материалы предохранителей

Время плавления вставки при пограничном токе велико (более 1 часа), а температура плавления ее материала достигает многих сотен градусов Цельсия. Все детали предохранителя нагреваются до высоких температур и происходит тепловое старение вставки. Для снижения температуры плавления плавкой вставки применяют легкоплавкие материалы и сплавы. Наиболее распространенные материалы плавких вставок – медь и цинк, реже применяется свинец и серебро. Так как цинк и свинец имеют сравнительно высокое удельное электрическое сопротивление, поперечное сечение вставок получается значительным. Вставки из цинка и свинца применяют, если необходимо получить большую выдержку времени при перегрузках. Медные вставки подвержены окислению, поэтому обычно применяются луженые вставки. Серебряные вставки имеют стабильные характеристики, но они дороги. В качестве материала плавкой вставки используется также алюминий. Пленка оксида на поверхности вставки защищает алюминий от коррозии и делает характеристику предохранителя стабильной. Большое удельное сопротивление материала компенсируется увеличением сечения вставки.

### 3.5.5. Типы и конструкции предохранителей

На токи от 15 до 60 А используются *предохранители с гашением дуги в закрытом объеме* (рис. 68). Плавкая цинковая вставка 1 фигурной формы помещена в фибровую трубку 2, плотно закрытую латунными колпаками 4. Детали 3 служат для подсоединения предохранителей к электрической цепи. Дуга горит в закрытом объеме и не выходит за пределы трубки.

*Предохранители с мелкозернистым наполнителем* более совершенны (рис. 69). Внутри фарфорового корпуса расположены плавкие ленточные вставки 2 и наполнитель – кварцевый песок. Плавкие вставки привариваются к диску 4, который крепится к пластинам 5, связанным с ножевыми контактами 9. Дуга в таком предохранителе горит в канале, образованном зернами наполнителя. Предельный отключаемый ток достигает 50 кА. Малые габариты, незначительные затраты дефицитных материалов, высокая токоограничивающая способность являются достоинствами этого предохранителя.

*Предохранители с жидкометаллическим контактом* имеют капилляр, заполненный металлом. При протекании большого тока жидкий металл испаряется, образуется паровая пробка и цепь размыкается. По-

сле определенного времени пары металла конденсируются и цепь восстанавливается. Предельный отключаемый ток таких предохранителей достигает 250 кА при напряжении 450 В переменного тока.

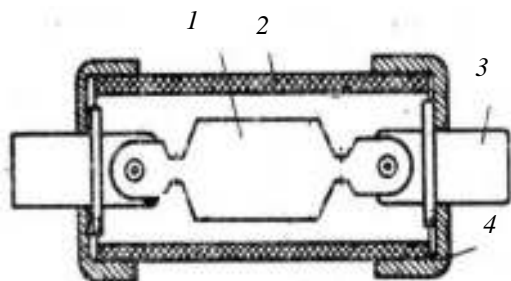


Рис. 68. Предохранитель с гашением дуги в закрытом объеме

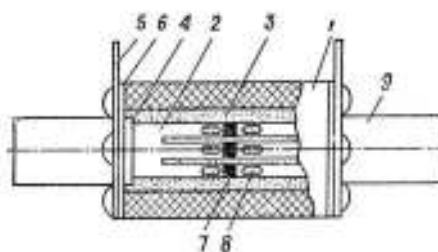


Рис. 69. Предохранитель с наполнителем

**Специальные предохранители разработаны для защиты полупроводниковых приборов.** Конструктивно быстродействующий предохранитель представляет собой корпус из прочного фарфора, внутри которого расположена плавкая вставка, имеющая перешеек с минимальным сечением, и кварцевый песок. Контакты укрепляются в корпусе и могут иметь различное конструктивное исполнение. Быстродействующие предохранители предназначены только для защиты от токов КЗ.

Для уменьшения габаритных размеров распредустройства выпускаются **блоки предохранитель-выключатель.**

### 3.5.6. Выбор предохранителей

Номинальный ток вставки предохранителя  $I_{Вн}$  выбирается равным или несколько большим номинального тока защищаемого объекта.

Если пуск двигателя длится 1 с, номинальный ток плавкой вставки  $I_{Вн}$  выбирается по пусковому току  $I_{п}$ . При этом пусковой ток двигателя связан с током вставки соотношением

$$I_{Вн} = 0,4I_{п}.$$

Для тяжелых условий пуска или для двигателей, работающих в повторно-кратковременном режиме, ток вставки выбирается из условия

$$I_{Вн} = (0,5 - 0,6)I_{п}.$$

Если предохранитель стоит в линии, питающей несколько двигателей, ток выбирается из условия

$$I_{Вн} = 0,4[I_{р} - (I_{п} - I_{Дн})],$$

где  $I_p$  – расчетный номинальный ток линии, равный  $\sum I_{Дн}$ . Разность  $I_n - I_{Дн}$  берется для двигателя, у которого она наибольшая.

Для двигателя с фазным ротором при  $I_n \leq 2I_{Дн}$  плавкая вставка выбирается из условия

$$I_{Вн} \geq (1 - 1,25)I_{Дн}.$$

Необходимо провести проверку предохранителя по условиям КЗ. При кратностях  $I_{КЗ} / I_{Вн} \geq 10 - 15$  время горения вставки не превышает 0,15–0,2 с, и разброс характеристик мало сказывается на времени.

Допускается применение предохранителей при кратностях  $I_{КЗ} / I_{Вн} \geq 3 - 4$ .

Номинальное напряжение предохранителя должно быть равно номинальному напряжению сети.

Между источником энергии и потребителем обычно устанавливается несколько предохранителей. Для обеспечения селективности защиты наименьшее фактическое время срабатывания предохранителя на больший ток  $t_{ср,б}$  должно быть больше наибольшего времени срабатывания предохранителя на меньший ток  $t_{ср,м}$ . С учетом производственных допусков на изготовление предохранителей необходимое условие для обеспечения селективности защиты выглядит как  $t_{ср,б} > 3t_{ср,м}$ .

## 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

### 4.1. Выключатели высокого напряжения

#### 4.1.1. Общие сведения о выключателях высокого напряжения

**Выключатель высокого напряжения** – электрический аппарат, предназначенный для коммутации цепей переменного тока с напряжением 3 кВ и выше во всех режимах, возможных в эксплуатации: включение и отключение номинальных токов, токов короткого замыкания, токов холостого хода силовых трансформаторов и емкостных токов конденсаторных батарей и длинных линий. Наиболее тяжелым режимом работы выключателя является отключение и включение токов короткого замыкания.

**Основными параметрами** выключателей высокого напряжения являются: *собственное и полное время включения и отключения, номинальное напряжение, номинальный длительный ток, номинальный ток термической стойкости, номинальный ток электродинамической стойкости, номинальные ток отключения и включения, номинальная мощность отключения.*

#### 4.1.2. Типы выключателей высокого напряжения

В **баковых масляных выключателях** токоведущие части изолируются между собой и от земли с помощью масла, находящегося в стальном баке, соединенном с землей.

Основными достоинствами этих выключателей являются высокая надежность, простота конструкции дугогасительных камер и механизма, высокая механическая прочность элементов, возможность использования встроенных трансформаторов тока и емкостных делителей напряжения. Простота конструкции не требует высокой квалификации обслуживающего персонала.

К недостаткам относятся: большие габариты и масса, необходимость периодической очистки масла, сложность и трудоемкость ремонта и ревизии выключателей с напряжением 110 кВ и выше, взрыво- и пожароопасность.

В **маломасляных выключателях** изоляция токоведущих частей от земли и между собой производится с помощью твердых диэлектриков и масла.

По сравнению с баковыми маломасляные выключатели имеют меньшие массы и габаритные размеры, возможность осмотра и ремонта без слива масла, возможность выполнения выключателей на напряжение до 500 кВ путем применения унифицированных узлов. Основными недостатками этих выключателей являются: меньшая надежность, низкий номинальный ток отключения.

В **воздушных выключателях** в качестве гасящей среды используется сжатый воздух, находящийся в баке под давлением 1–5 МПа. Дугогасительная система размещается внутри изоляционной конструкции. Изоляция токоведущих частей между собой осуществляется с помощью твердых диэлектриков и воздуха. Воздушные выключатели обладают большой массой и габаритами.

Ввиду отмеченных недостатков масляные и воздушные выключатели заменяются на вакуумные и элегазовые.

В **элегазовых выключателях** гашение дуги осуществляется за счет охлаждения ее движущимся с большой скоростью элегазом, который используется и как изолирующая среда.

В отличие от масляных и воздушных выключателей **электромагнитные выключатели** для работы не требуют масла или сжатого воздуха, более просты и удобны в эксплуатации, обладают высокой надежностью и большим сроком службы.

В **вакуумных выключателях** контакты расходятся под вакуумом (давление равно  $10^{-4}$  Па). Возникающая при расхождении контактов дуга быстро гаснет благодаря интенсивной диффузии зарядов в вакууме.

Режим отключения можно значительно облегчить, если ограничить выделяемую в дуге энергию. Это достигается в **синхронизированных выключателях** синхронизацией момента начала расхождения контактов с моментом прохождения тока через нуль при высокой скорости движения контактов. Схемы и методы синхронизации весьма разнообразны.

Электромагнитные выключатели по своему принципу аналогичны контакторам постоянного тока с лабиринтно-щелевой камерой. Гашение дуги происходит за счет увеличения сопротивления дуги вследствие ее интенсивного удлинения и охлаждения.

Номинальное напряжение электромагнитных выключателей не превышает 10 кВ, так как большой остаточный ток может приводить к пробоем по раскаленной поверхности пластин.

Конструктивная схема вакуумного выключателя представлена на рис. 70.

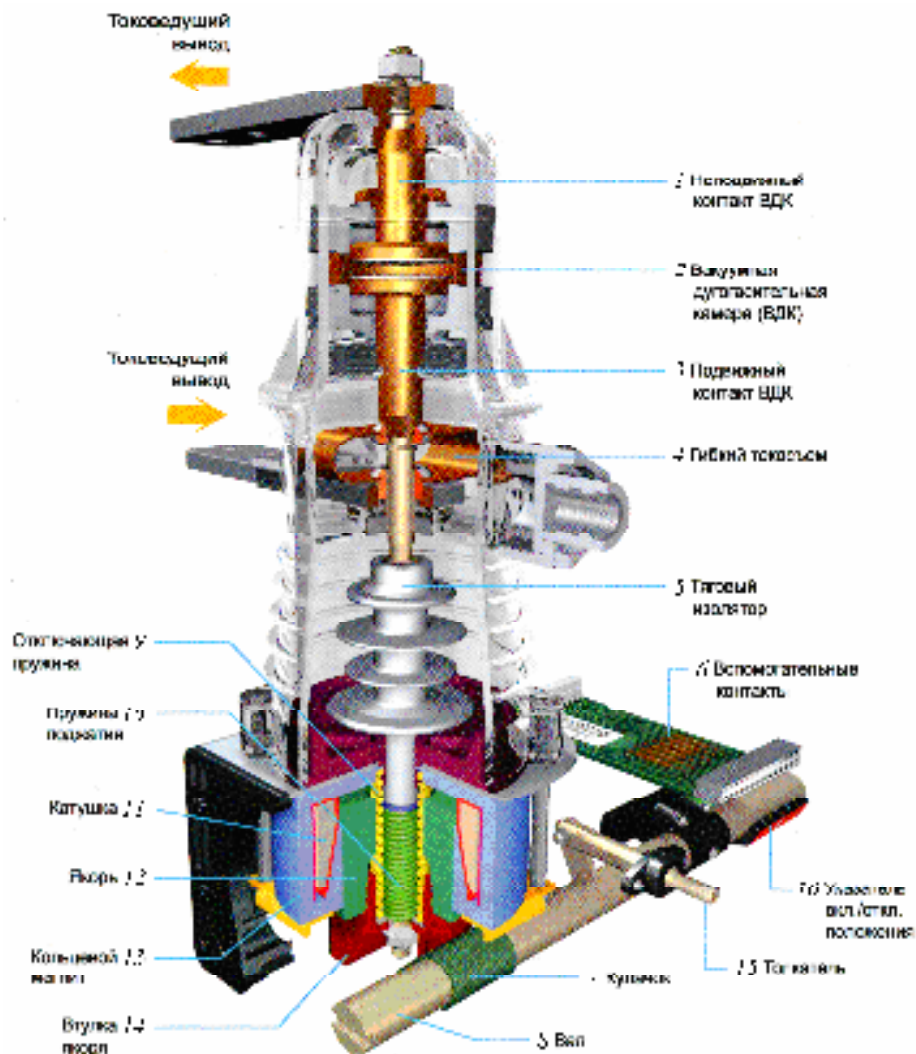


Рис. 70. Вакуумный выключатель

**Выключатели нагрузки** используются для отключения номинальных токов. Для гашения дуги используются камеры с автогазовым, электромагнитным, элегазовым дутьем и вакуумными элементами.

#### 4.1.3. Выбор выключателей высокого напряжения

При выборе выключателя его номинальные параметры сравниваются с параметрами сети в месте его установки. Выключатель выбирается по наиболее тяжелому возможному режиму работы. **Номинальное напряжение выключателя** должно быть равно или больше номинального напряжения сети. **Номинальный длительный ток** выключателя должен быть больше номинального тока установки. **Номинальный ток отключения** выключателя должен быть больше максимального расчет-

ного тока короткого замыкания к моменту расхождения контактов. **Номинальный ток включения** должен быть не менее ударного тока короткого замыкания, протекающего через выключатель.

При частых коммутациях рекомендуется применять вакуумные и элегазовые выключатели, обладающие большим сроком службы.

## 4.2. Разъединители, отделители и короткозамыкатели

### 4.2.1. Общие сведения о разъединителях

**Разъединитель** – электрический аппарат, предназначенный для включения и отключения цепи высокого напряжения либо при токах, значительно меньших номинальных, либо в случаях, когда отключается номинальный ток, но напряжение на контактах аппарата недостаточно для образования дуги.

В первом случае разъединители применяются, как правило, для отсоединения от напряжения высоковольтного оборудования перед ревизией и ремонтом. Для безаварийной работы обслуживающего персонала ток в цепи сначала отключается выключателем QF (рис. 71, а), и только потом размыкаются контакты разъединителей QS1 и QS2. В этом случае разъединителями отключаются небольшие емкостные токи, создаваемые опорной изоляцией отключаемого аппарата и присоединенными к нему проводниками.

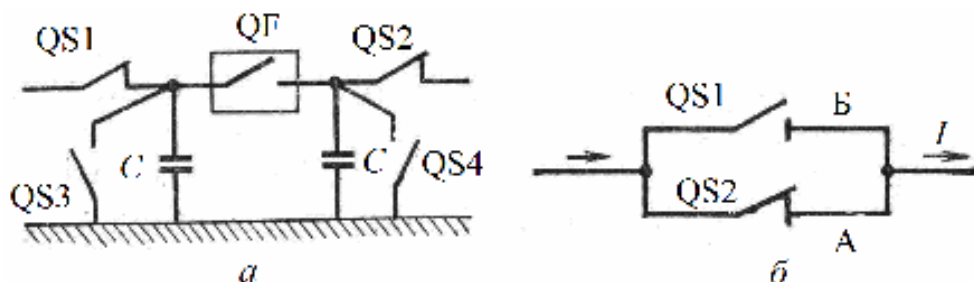


Рис. 71. Схемы включения разъединителей

После размыкания QS1 и QS2 выключатель QF, подлежащий ремонту, должен быть заземлен с обеих сторон с помощью дополнительных разъединителей QS3 и QS4. Если ножи QS3 и QS4 не заземлены, то на выводах выключателя QF может возникнуть высокий потенциал за счет емкостной связи с линиями высокого напряжения. Для удешевления и упрощения схем коммутации разъединители используются для отключения небольших токов (токов холостого хода трансформаторов, зарядных токов воздушных и кабельных линий). В ряде случаев разъе-



динителями можно пользоваться для перевода нагрузки с одной ветви А на другую Б (рис. 71, б). Для этого при замкнутом разъединителе QS2 выключают разъединитель QS1, после чего разъединитель QS2 отключают. Дуга на его контактах не возникает, так как напряжение на них равно падению напряжения на ветви QS1, которое ничтожно мало.

К разъединителям предъявляются следующие **требования**: контактная система должна надежно пропускать номинальный ток сколь угодно длительное время и иметь необходимые динамическую и термическую стойкости; разъединитель и механизм его привода должны надежно удерживаться во включенном положении при протекании тока короткого замыкания, в отключенном положении подвижный контакт должен быть надежно фиксирован, так как самопроизвольное включение может привести к тяжелым авариям; промежуток между разомкнутыми контактами должен иметь повышенную электрическую прочность; привод разъединителя целесообразно блокировать с выключателем.

#### 4.2.2. Конструкции разъединителей

Для внутренних установок, не подверженных воздействию атмосферы и при напряжении не выше 20 кВ, наиболее широко применяются **рубящие разъединители** с движением подвижного контакта (ножа) в вертикальной плоскости. Для получения электродинамической стойкости контактов необходимо соответствующее контактное нажатие. С ростом тока контактное нажатие и усилие, необходимое для включения, возрастают. При ручных приводах контактное нажатие стремятся выбирать возможно малым. С этой целью применяют сдвоенные ножи и электромагнитные замки. Для повышения электродинамической стойкости контактов используются электродинамические силы, возникающие в токоведущих элементах. Для управления разъединителями применяются рычажные системы с ручным или моторным приводом. Для дистанционного управления применяются электрические и пневматические приводы.

Для наружной установки широко используются **разъединители поворотного типа**.

При напряжении более 300 кВ значительную экономию площади дают **подвесные разъединители**.

Во избежание возникновения короткого замыкания при отключении разъединителя, при прохождении через него номинального тока, разъединители блокируются с выключателями с помощью механических, механических замковых и электромагнитных замковых блокировок.

### 4.2.3. Выбор разъединителей

**Номинальное напряжение** разъединителя должно соответствовать номинальному напряжению высоковольтной сети.

**Наибольший длительный ток** нагрузки потребителя не должен превышать номинальное значение длительного тока разъединителя.

**Ударный ток короткого замыкания** в месте установки разъединителя не должен превышать допустимую амплитуду ударного тока короткого замыкания разъединителя.

**Ток термической стойкости**  $I_T$  в течение времени  $t_T$ , гарантированный заводом-изготовителем, и ток короткого замыкания, протекающий через разъединитель в течение времени, должны быть связаны соотношением

$$I_T^2 t_T \geq I_{K3}^2 t_{K3}.$$

Внешние условия работы разъединителя должны соответствовать реальным условиям эксплуатации аппарата (скорость ветра, температура, гололед).

### 4.2.4. Общие сведения об отделителях и короткозамыкателях

**Короткозамыкатель** – быстродействующий контактный электрический аппарат, предназначенный для создания искусственного короткого замыкания сети по сигналу релейной защиты.

**Отделитель** – это разъединитель, который быстро отключает обесточенную цепь после подачи команды на его привод. Процесс отключения в отделителе длится 0,5–1 с.

На рис. 72 приведена схема питания от одной линии двух трансформаторных групп Т1 и Т2. В схему введены короткозамыкатели QK1, QK2 и отделители Q1, Q2, которые при нормальном режиме работы замкнуты. При ухудшении изоляции трансформатора Т1 срабатывает газовое реле, и по его сигналу включается короткозамыкатель. В цепи возникает искусственное короткое замыкание. Под действием тока короткого замыкания срабатывает выключатель защиты QF1 и обе группы трансформаторов (Т1 и Т2) обесточиваются. С помощью релейной защиты трансформатора Т1 отключается также выключатель QF2, после чего с некоторой выдержкой отключается отделитель Q1. Так как режим искусственного короткого замыкания оказался отключенным, снова включается выключатель QF1. Если до аварии выключатель QF4 был отключен, то после включения выключателя QF1 он может быть включен. При этом будет восстановлено питание потребителей на шинах 10 кВ первой трансформаторной группы.

Таким образом, в этой схеме удастся не ставить выключатели на стороне 220 кВ трансформаторов Т1 и Т2. Для надежной работы необходима четкая последовательность в работе короткозамыкателей, выключателей и отделителей.

Эффективность схемы тем выше, чем больше номинальное напряжение сети. Устраняются выключатели, аккумуляторные батареи, компрессорные установки на стороне 35–220 кВ, уменьшается площадь подстанции и ее стоимость, сокращаются сроки строительства.

Наиболее перспективно применение элегазовых аппаратов. На рис. 73 представлен элегазовый короткозамыкатель на напряжение 110 кВ. В фарфоровом цилиндре 1 установлены контакты 2 и 3. Давление элегаза в цилиндре составляет 0,3 МПа. Привод подвижного контакта 3 осуществляется тягой 5. Стальной сильфон 4 обеспечивает герметизацию полости цилиндра 1.

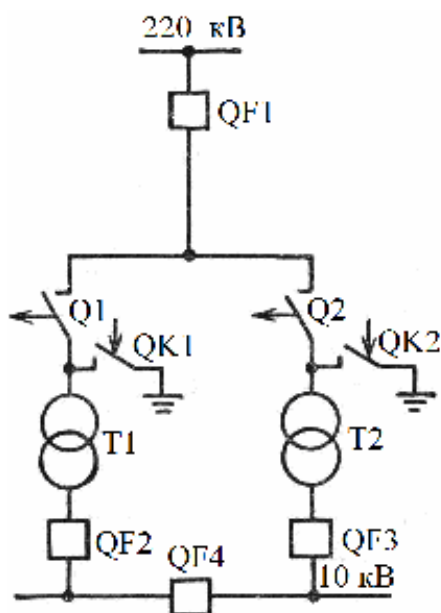


Рис. 72. Схема включения короткозамыкателей

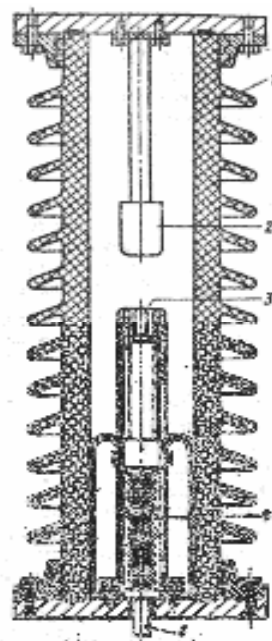


Рис. 73. Элегазовый короткозамыкатель

#### 4.2.5. Выбор отделителей и короткозамыкателей

**Номинальное напряжение** короткозамыкателя должно соответствовать номинальному значению напряжения сети.

**Динамическая и термическая стойкости** короткозамыкателя должны соответствовать току короткого замыкания в месте его установки.

**Время отключения** короткозамыкателя должно соответствовать требованиям схемы автоматики.

Номинальные данные по току и напряжению отделителя выбираются так же, как и для разъединителя. Кроме того, время отключения должно соответствовать требованиям схемы автоматики.

Ток должен быть не меньше ударного тока короткого замыкания, протекающего через выключатель.

### 4.3. Реакторы

#### 4.3.1. Общие сведения о реакторах

**Реактор** – это электрический аппарат, предназначенный для ограничения токов короткого замыкания и поддержания напряжения на шинах при аварийном режиме.

Реактор выполняется в виде обмотки с неизменной индуктивностью.

#### *Принцип действия реактора*

Генератор G питает сборные шины, от которых отходят линии к потребителю. За выключателем QF1 реактор отсутствует, а за выключателем QF2 реактор L установлен.

При коротком трехфазном замыкании ток  $I_{K31}$  определяется в основном индуктивным сопротивлением генератора:

$$I_{K31} = \frac{U_H}{\sqrt{3}X_G} = I_{GH} \frac{100}{x_G},$$

где  $I_{GH}$  – номинальный ток генератора;  $U_H$  – номинальное напряжение генератора;  $x_G = \frac{I_{GH}X_G\sqrt{3}}{U_H}100, \%$  – относительное индуктивное сопротивление генератора.

Напряжение при коротком замыкании на сборных шинах будет равно нулю и на всех отходящих линиях пропадет напряжение.

Ток короткого замыкания в линии с реактором определяется суммарным сопротивлением генератора и реактора:

$$I_{K32} = \frac{U_H}{\sqrt{3}(X_G + X_P)}.$$

Как правило, один генератор обслуживает несколько десятков потребителей, поэтому номинальный ток линии во много раз меньше номинального тока генератора. Длительный ток реактора выбирается равным току линии, при этом  $I_{PH} \ll I_{GH}$ . Если  $x_G = x_P$ , то  $X_P \gg X_G$  и

$$I_{K32} \approx I_{PH} \frac{100}{x_P} \ll I_{K31}.$$

Так как реактор обладает высокой надежностью, выбор аппаратуры линии производится по току  $I_{K32} \ll I_{K31}$ , что облегчает и удешевляет распределительное устройство.

В режиме короткого замыкания падение напряжения на реакторе  $I_{K3}X_P \gg I_{K3}X_\Gamma$ , так как  $X_P \gg X_\Gamma$  и напряжение на шинах относительно земли мало отличается от номинального фазного напряжения. При номинальном режиме  $X_P \ll Z_H$ , поэтому падение напряжения на реакторе незначительно.

Для уменьшения потерь напряжения на реакторе в номинальном режиме, упрощения и удешевления распределительных устройств применяют **сдвоенные реакторы**. При обычных реакторах (рис. 74, а) каждая отходящая линия имеет свой реактор. Каждая трехфазная группа реакторов размещается в специальной ячейке распределительного устройства. В сдвоенных реакторах (рис. 74, б) реакторы соседних ветвей сближены так, что между ними существует сильная магнитная связь.

В номинальном режиме магнитные поля реакторов направлены встречно и оказывают размагничивающее действие друг на друга. В результате индуктивное сопротивление ветви падает, следовательно, уменьшается падение напряжения на реакторе.

Падение напряжения на ветви реактора  $\Delta U_B$  при номинальном токе

$$\Delta U_B = I_{нВ}(X_{PB} - X_M) = I_{нВ}X_{PB}(1 - X_M / X_{PB}) = I_{нВ}X_{PB}(1 - k),$$

где  $X_{PB}$  – индуктивное сопротивление ветви реактора;  $X_M = \omega M$  – сопротивление взаимной индукции ветвей реактора ( $M$  – коэффициент взаимной индуктивности);  $k = M / L_{PB}$  – коэффициент связи ветвей реактора;  $L_{PB}$  – индуктивность одной ветви.

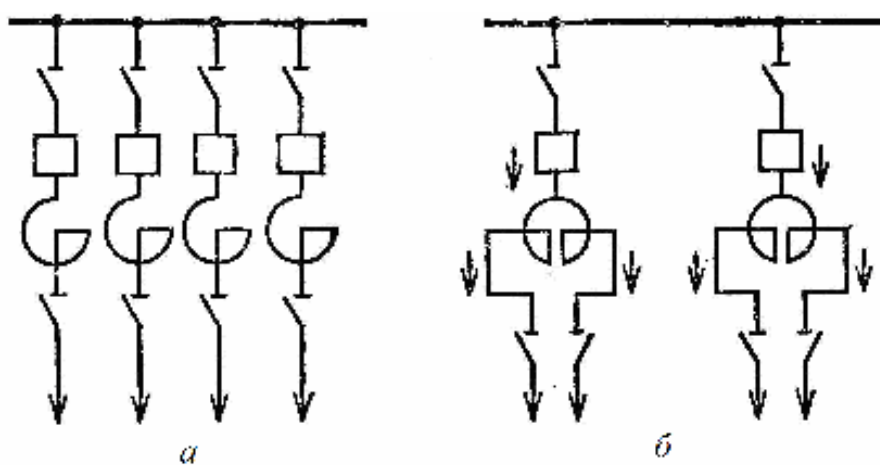


Рис. 74. Схемы реакторов

Чем больше коэффициент связи, тем меньше падение напряжения в ветви. С точки зрения уменьшения падения напряжения в номинальном режиме желательно увеличение коэффициента связи  $k$ .

Для увеличения коэффициента связи реакторы должны быть возможно ближе друг к другу.

Сдвоенные реакторы позволяют уменьшить габариты аппарата, удешевляют и упрощают распределительное устройство.

**Основными параметрами реактора** являются: *номинальное напряжение; номинальный ток; реактивное сопротивление; ток термической стойкости, отнесенный к определенному времени; ток динамической стойкости.*

**Номинальное напряжение** – это напряжение сети, в которой реактор предназначен работать. Изоляция обмотки от земли осуществляется опорными фарфоровыми изоляторами.

**Номинальный ток** – длительный ток, который, протекая по обмотке, нагревает ее до температуры, близкой к допустимой.

Номинальный ток реактора может быть равен 3000–4000 А, при этом активные потери могут достигать нескольких десятков киловатт. Кроме того, имеют место дополнительные потери из-за того, что проводники реактора находятся в мощном магнитном поле. Коэффициент добавочных потерь достигает 1,3–1,5.

Одним из основных параметров реактора является его **индуктивность**  $L_p$ .

Для бетонных реакторов, имеющих обмотку из  $w$  витков в виде катушки высотой  $h$  (м), толщиной  $b$  (м) и средним диаметром  $D$  (м), индуктивность (мГн) может быть определена по формуле Корндорфера

$$L_p = 10,5w^2 D \left[ \frac{D}{2(b+h)} \right]^p \cdot 10^{-4},$$

где  $p = \frac{3}{4}$  при  $0 < \frac{D}{2(b+h)} \leq 1$  и  $p = \frac{1}{2}$  при  $1 \leq \frac{D}{2(b+h)} \leq 3$ .

**Ток термической стойкости**  $I_m = I_{кзР}$  должен выдерживаться в течение времени  $t_m$ .

Если  $x_p < 3\%$ , то при расчете тока короткого замыкания желательно учитывать сопротивление источника питания.

При прохождении тока короткого замыкания между реакторами и внутри реактора создаются электродинамические силы, которые стремятся его разрушить. Механическая прочность реактора характеризуется **током электродинамической стойкости**. При расчете электродинамической стойкости за основу берется ударный ток  $i_{уд} = 1,8\sqrt{2}I_{кзР}$ .

Расстояние между реакторами определяется высотой опорных изоляторов. Так как при напряжении 6–10 кВ высота этих изоляторов мала, то при больших токах в реакторах возникают электродинамические силы, которые могут разрушить изоляторы, работающие и на сжатие, и на разрыв.

В реакторах на большие токи электродинамические силы при вертикальной установке в аварийном режиме столь велики, что изоляторы не могут обеспечить необходимую электродинамическую стойкость. В этих случаях приходится прибегать к горизонтальной установке реакторов. Расстояние между осями может быть выбрано достаточно большим.

#### 4.3.2. Конструкции реакторов

Наиболее распространенными являются **бетонные реакторы**. На рис. 75 представлен трехфазный комплект таких реакторов. Из многожильного провода  $I$  намотаны обмотки реактора  $A, B, C$ .

Заливкой в специальные формы получают бетонные вертикальные стойки – колонны 2, которые скрепляют между собой отдельные витки обмоток. Торцы колонн имеют шпильки с изоляторами 3, 4.

Для получения необходимой прочности электрической изоляции реактор подвергают интенсивной сушке под вакуумом и пропитке влагостойким изоляционным лаком.

Охлаждение реакторов, как правило, естественное.

Между отдельными витками в ряду обмотки реактора и между рядами выдерживается значительный зазор –  $(3,5–4,5) \cdot 10^{-2}$  м, что улучшает охлаждение отдельных витков и повышает электрическую прочность изоляции.

При больших номинальных токах (более 400 А) применяется несколько параллельных ветвей. Для равномерного распределения тока по ветвям применяется транспозиция витков. Все витки ветвей должны быть одинаково расположены относительно оси реактора.

В качестве обмоточного провода используется многожильный медный или алюминиевый кабель большого сечения. Кабель покрывается несколькими слоями кабельной бумаги толщиной  $0,12 \cdot 10^{-3}$  м и хлопчатобумажной оплеткой. Общая толщина изоляции примерно –  $1,5 \cdot 10^{-3}$  м. Максимальная допустимая температура при длительном режиме – не выше 105 °С, при КЗ – не выше 250 °С.

В трехфазном комплекте наибольшему нагреву подвергается верхний реактор, поскольку подходящий снизу воздух уже подогрет реакторами, расположенными ниже.

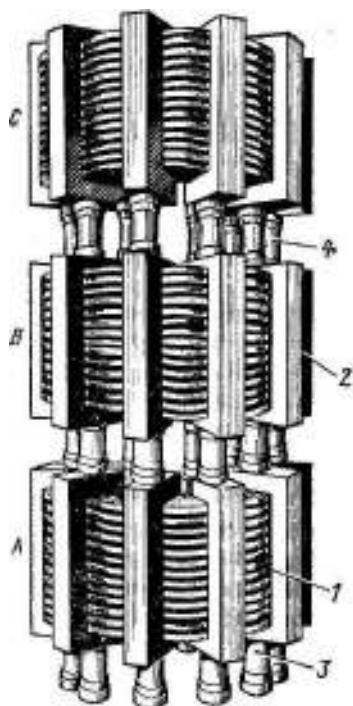


Рис. 75. Бетонный реактор

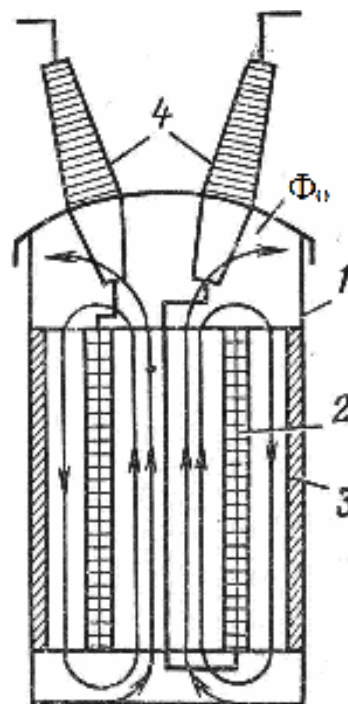


Рис. 76. Масляный реактор

Вокруг обмотки реактора замыкается мощное магнитное поле. Для уменьшения дополнительных потерь все ферромагнитные детали (балки, арматура железобетонных стен) удаляются от обмотки на расстояние, не меньшее ее внешнего радиуса.

Бетонные реакторы применяются в закрытых распределительных устройствах при напряжении не выше 35 кВ. Недостатками таких реакторов являются большие масса и габаритные размеры.

Применение ферромагнитных магнитопроводов позволяет резко снизить размеры реактора, однако при больших токах происходит насыщение магнитопроводов и уменьшение индуктивности, что уменьшает токоограничивающий эффект реактора. В связи с этим применение магнитопроводов в токоограничивающих реакторах не получило распространения.

При напряжении больше 35 кВ и для установки на открытой части подстанций применяются **реакторы в масляном исполнении** (рис. 76). В стальной бак 1 с трансформаторным маслом погружена обмотка 2. Применение масла позволяет уменьшить изоляционные расстояния между обмоткой и заземленными частями реактора и улучшить охлаждение обмотки за счет конвекции масла. В результате уменьшаются масса и габаритные размеры. Выводы обмотки присоединяются к контактам проходных изоляторов 4. Потери на вихревые токи в стенках бака уменьшают применением короткозамкнутого витка в виде экрана 3.



Разработаны также **тороидальные реакторы**. В таких реакторах внешнее поле рассеяния практически отсутствует и нагрев бака не возникает. Тороидальные реакторы на напряжение 110 кВ и выше имеют более высокие технические и экономические показатели по сравнению с бетонной конструкцией.

## 4.4. Измерительные трансформаторы

### 4.4.1. Общие сведения об измерительных трансформаторах

**Измерительный трансформатор** – электрический трансформатор для контроля напряжения, тока или фазы сигнала первичной цепи.

**Измерительные трансформаторы тока и напряжения** предназначены для уменьшения первичных токов и напряжений до значений, наиболее удобных для подключения измерительных приборов, реле защиты, устройств автоматики.

Применение измерительных трансформаторов обеспечивает безопасность работающих, так как цепи высшего и низшего напряжения разделены, а также позволяет унифицировать конструкцию приборов и реле.

Измерительные трансформаторы **классифицируются** следующим образом:

- **по виду измеряемого значения** – трансформаторы напряжения; трансформаторы тока (переменного); трансформаторы постоянного тока;
- **по количеству коэффициентов трансформации** – однодиапазонные; многодиапазонные;
- **по способу установки** – внутренней установки; наружной установки; встроенные; накладные; переносные;
- **по материалу диэлектрика** – масляные; газонаполненные; сухие.

Техническими характеристиками трансформаторов тока являются: **номинальный первичный и вторичный ток** трансформаторов тока (стандартная шкала номинальных первичных токов содержит значения от 1 до 40 000 А, номинальный вторичный ток принимается обычно равным 5 или 1 А). Отношение номинального первичного к номинальному вторичному току представляет собой **коэффициент трансформации**  $K = I_{н1} / I_{н2}$ .

Трансформаторы тока характеризуются **токовой погрешностью**  $\Delta I = I_2 \cdot K \cdot 100 / I_1$  (в процентах) и **угловой погрешностью** (в минутах). В зависимости от токовой погрешности измерительные трансформаторы тока разделены на пять классов точности: 0,2; 0,5; 1; 3; 10. Наименование класса точности соответствует предельной токовой погрешности трансформатора тока при первичном токе, равном 1–1,2 номинального.

Для лабораторных измерений предназначены трансформаторы тока класса точности 0,2, для присоединений счетчиков электроэнергии – трансформаторы тока класса 0,5, для присоединения щитовых измерительных приборов – классов 1 и 3.

**Нагрузкой трансформатора тока** является полное сопротивление внешней цепи. Активные и индуктивные сопротивления представляют собой сопротивление приборов, проводов и контактов. Нагрузку трансформатора можно также характеризовать кажущейся мощностью. Под номинальной нагрузкой трансформатора тока понимают нагрузку, при которой погрешности не выходят за пределы, установленные для трансформаторов данного класса точности.

**Электродинамическую стойкость** трансформаторов тока характеризуют номинальным током динамической стойкости или кратностью этого тока по отношению к номинальному.

**Термическая стойкость** определяется номинальным током термической стойкости или отношением тока термической стойкости к номинальному и допустимым временем действия тока термической стойкости.

Техническими характеристиками трансформаторов напряжения являются: **номинальные первичное и вторичное напряжения** (обычно 100 В), коэффициент трансформации  $K = U_{н1} / U_{н2}$ .

В зависимости от погрешности различают следующие классы точности трансформаторов напряжения: 0,2; 0,5; 1:3.

**Нагрузкой трансформаторов напряжения** является мощность внешней вторичной цепи. Под номинальной вторичной нагрузкой понимают наибольшую нагрузку, при которой погрешность не выходит за допустимые пределы, установленные для трансформаторов данного класса точности.

#### 4.4.2. Конструкции и схемы включения измерительных трансформаторов

Трансформатор тока имеет замкнутый магнитопровод с двумя обмотками. Через первичную обмотку пропускается измеряемый ток, вторичная обмотка подключается к измерительным приборам или реле. Первичная обмотка изолирована от вторичной в соответствии с классом изоляции. Один вывод вторичной обмотки обязательно заземляется.

В случае повреждения изоляции приборы и реле остаются под потенциалом земли.

По конструкции различают трансформаторы тока **катушечные, одновитковые** (типа ТПОЛ), **многовитковые** с литой изоляцией (типа

ТПЛ и ТЛМ). Трансформатор типа ТЛМ предназначен для комплектного распределительного устройства (КРУ) и конструктивно совмещен с одним из штепсельных разъемов первичной цепи ячейки.

**Одновитковые трансформаторы тока** применяются при токах 400 А и более, так как такие трансформаторы имеют большую погрешность при малом номинальном первичном токе. Одновитковый трансформатор типа ТПОЛ-10 с номинальным напряжением 10 кВ представлен на рис. 77. Стержень 4 (первичная обмотка), магнитопровод 1 и крепежное кольцо 3 устанавливаются в специальную форму и заливаются жидкой смесью эпоксидной смолы, пылевидного кварцевого песка и отвердителя. По сути дела, трансформатор тока имеет два независимых трансформатора, параметры которых могут быть различными. Магнитопроводы выполняются в виде двух тороидальных сердечников 1, навитых из текстурованного материала.

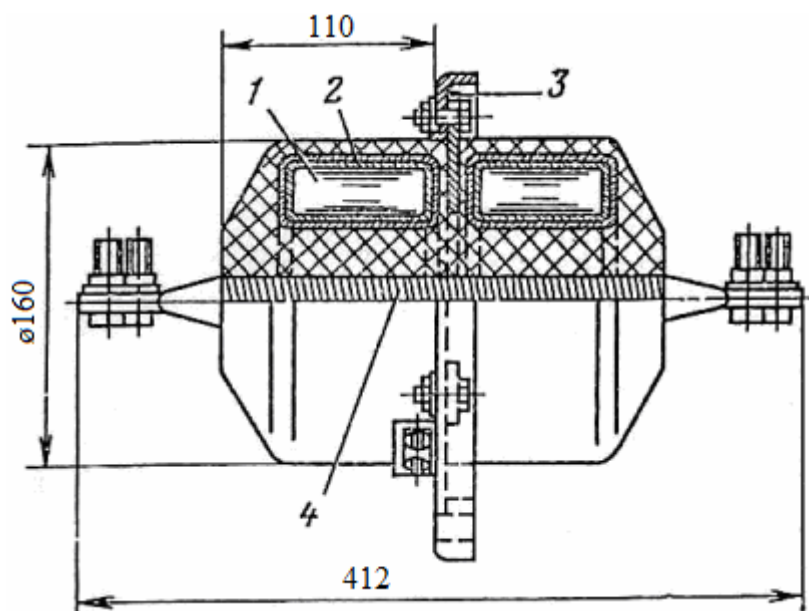


Рис. 77. Одновитковый трансформатор тока

Одновитковые трансформаторы могут быть встроенными. В этом случае используется токоведущий стержень и изолятор другого аппарата или оборудования (выключателя, силового трансформатора, выходного изолятора и др.). Применение встроенных трансформаторов тока дает большой экономический эффект.

При малых первичных токах (ниже 400 А) для получения высокого класса точности применяются **многовитковые трансформаторы тока**. На прямоугольном шихтованном магнитопроводе расположена вто-

ричная обмотка. Первичная обмотка выполняется из медной шины. Все детали залиты эпоксидным компаундом 4.

Недостатком данной конструкции является возможность появления значительного падения напряжения на первичной обмотке из-за относительно большой индуктивности.

При напряжении 35 кВ и выше для открытых установок применяются трансформаторы тока с масляной изоляцией.

Для больших токов (более 2 кА) применяют трансформаторы типа ТШЛ и ТПШЛ, у которых роль первичной обмотки выполняет шина. Электродинамическая стойкость таких трансформаторов тока определяется стойкостью шины.

Для открытых распределительных устройств (ОРУ) выпускают трансформаторы типа ТФН в фарфоровом корпусе с бумажно-масляной изоляцией и каскадного типа ТРН. Для релейной защиты имеются специальные конструкции. На выводах масляных баковых выключателей и силовых трансформаторов напряжением 35 кВ и выше устанавливаются встроенные трансформаторы тока. Погрешность их при прочих равных условиях больше, чем у отдельно стоящих трансформаторов.

Первичная обмотка трансформатора тока W1 (рис. 78) включается последовательно в контролируемую электрическую цепь переменного тока, а вторичная обмотка W2 – в последовательную цепь амперметра или других измерительных приборов.

В установках напряжением до 18 кВ применяются трехфазные и однофазные трансформаторы напряжения, при более высоких напряжениях – только однофазные. При напряжениях до 20 кВ имеется большое число типов трансформаторов напряжения: сухие (НОС), масляные (НОМ, ЗНОМ, НТМИ, НТМК), с литой изоляцией (ЗНОЛ). Следует отличать однофазные двухобмоточные трансформаторы НОМ от однофазных трехобмоточных трансформаторов ЗНОМ. Трансформаторы типов ЗНОМ-15, -20 -24 и ЗНОЛ-06 устанавливаются в комплектных токопроводах мощных генераторов. В установках напряжением 110 кВ и выше применяют трансформаторы напряжения каскадного типа НКФ и емкостные делители напряжения НДЕ.

Конструкция трансформатора напряжения до 35 кВ аналогична конструкции силовых трансформаторов. При этом индукция в магнитопроводе значительно меньше, чем у силовых трансформаторов. Это снижает погрешность, позволяет в некоторых случаях проводить испытания индуцированным напряжением.

В зависимости от назначения могут применяться разные схемы включения трансформаторов напряжения. Два однофазных трансформатора напряжения, соединенные в неполный треугольник, позволяют из-

мерять два линейных напряжения. Целесообразна такая схема для подключения счетчиков и ваттметров. Для измерения линейных и фазных напряжений могут быть использованы три однофазных трансформатора (ЗНОМ, ЗНОЛ), соединенные по схеме «звезда – звезда», или трехфазный типа НТМИ. Так же соединяются в трехфазную группу однофазные трехобмоточные трансформаторы типа ЗНОМ и НКФ.

Присоединение расчетных счетчиков к трехфазным трансформаторам напряжения не рекомендуется, так как они имеют обычно несимметричную магнитную систему и увеличенную погрешность. Для этой цели желательно устанавливать группу из двух однофазных трансформаторов, соединенных в неполный треугольник.

Схема включения трансформатора напряжения показана на рис. 79.

К зажимам первичной обмотки подводится измеряемое напряжение  $U_1$ ; обмотка  $w_1$  включается параллельно нагрузке. Вторичное напряжение  $U_2$  с обмотки  $w_2$  подаётся на вольтметр или цепи напряжения измерительных приборов и реле защиты.

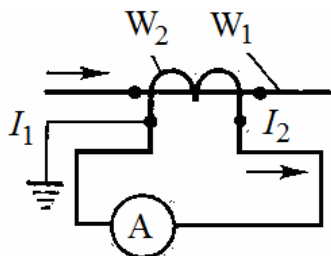


Рис. 78. Схема включения трансформатора тока

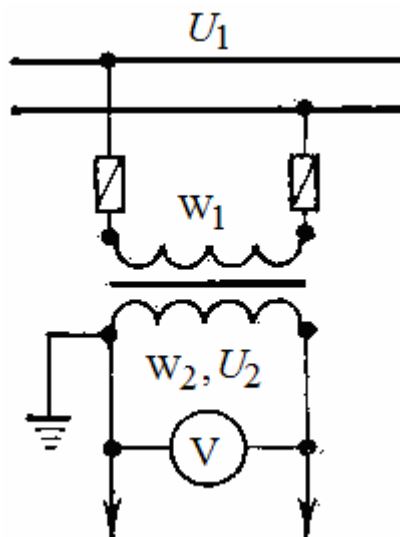


Рис. 79. Схема включения трансформатора напряжения

## 5. ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

### 5.1. Общие сведения об электронных аппаратах

#### 5.1.1. Понятие *электронный аппарат*

**Электронные аппараты** являются бесконтактными статическими аппаратами, выполненными на базе полупроводниковых приборов.

В электронных аппаратах основным элементом, управляющим потоком электрической энергии, являются коммутирующие статические (бесконтактные) ключи. Функции бесконтактных ключей в настоящее время преимущественно выполняют **силовые полупроводниковые приборы** (СПП). К силовым полупроводниковым приборам относятся приборы с максимально допустимым средним током свыше 10 А или импульсным током свыше 100 А.

**Принцип действия** таких аппаратов основан на изменении проводимости входящих в них управляемых нелинейных элементов. При этом диапазон изменения проводимости может быть очень широким. Проводимость может изменяться непрерывно или дискретно. Дискретное (или импульсивное) управление является более предпочтительным, так как позволяет реализовывать более высокие технико-экономические характеристики, в частности получить существенно лучшее значение КПД. Поэтому в современных электронных аппаратах исполнительные органы работают в ключевом режиме.

Силовые полупроводниковые приборы работают в качестве электронных ключей в двух состояниях – включенном, соответствующем высокой проводимости, и выключенном, соответствующем низкой проводимости. В этих режимах их вольтамперные характеристики (ВАХ) подобны характеристикам нелинейных элементов релейного типа. Физической основой большинства таких приборов являются полупроводниковые структуры с различными типами электронной проводимости. Управление электронной проводимостью позволяет осуществлять бездуговую коммутацию электрических цепей.

**По принципу действия** силовые полупроводниковые приборы разделяются на три основных вида: **диоды** (вентили), **транзисторы** и **тиристоры**.

**По степени управляемости** силовые полупроводниковые приборы разделяются на две группы: **не полностью управляемые приборы**, которые можно переводить в проводящее состояние, но не наоборот, например, тиристоры (условно к этой группе можно отнести также и диоды, состояние которых определяется полярностью приложенного к ним

напряжения); **полностью управляемые приборы**, которые можно переводить в проводящее состояние и обратно сигналом управления (например, транзисторы или запираемые тиристоры).

Сигнал управления формируется электронным устройством (формирователем), входящим в состав **системы управления** (СУ) аппарата, преобразователя или другого устройства, содержащего электронный ключ. Такое устройство именуют оконечным каскадом СУ (или формирователем импульсов), а в технической литературе его часто называют драйвером (*driver*). Основная функция драйвера заключается в формировании сигнала управления, необходимого для включения или выключения ключа при воздействии информационного сигнала малой мощности. Функционально драйвер аналогичен приводу электромеханического коммутационного аппарата.

В 80 гг. XX в. начался новый этап в развитии силовой электроники, который был обусловлен освоением мощных быстродействующих, полностью управляемых силовых полупроводниковых приборов: мощных полевых транзисторов; транзисторов с изолированным затвором; запираемых тиристоров.

Одновременно начался выпуск силовых интегральных модулей – компактных конструкций, в которых размещены силовые электронные ключи и элементы микроэлектроники с различной степенью интеграции. Такие модули позволяют реализовывать различные законы регулирования, включая формирование сигналов защиты, диагностики и др. При необходимости такие модули могут также включать в себя микропроцессоры или соответствующий интерфейс для сопряжения с устройствами управления более высоких уровней.

Элементная база современной силовой электроники расширила диапазон коммутируемых мощностей до единиц мегаватт, позволила поднять верхний уровень частоты коммутации электронных ключей, что сделало возможным создавать аппараты управления, регулирования и защиты постоянного и переменного тока с высокими технико-экономическими показателями.

### **5.1.2. Преимущества и недостатки электронных аппаратов**

**Преимуществами** электронных аппаратов являются: отсутствие подвижной механической системы; бездуговая коммутация цепей, отсутствие электрического износа; высокая стойкость к ударным механическим нагрузкам и вибрациям; практически неограниченное число коммутаций силовых ключей; большой ресурс работы; высокое быстродействие; надёжная работа во взрывоопасных и агрессивных средах; от-

сутствие акустического шума во время работы; широкие возможности по управлению выходными параметрами; широкие функциональные возможности; низкое значение мощности, затрачиваемое на управление.

Наряду с неоспоримыми преимуществами силовым электронным аппаратам присущи следующие **недостатки**: зависимость электрических параметров от температуры, приложенного напряжения, наличия источников проникающей радиации и др.; существенные различия в электрических параметрах ключей одного типа и класса; невысокая глубина коммутации (отношение электрического сопротивления ключа в отключенном и включенном состояниях); отсутствие видимого разрыва цепи в выключенном состоянии, наличие остаточного тока, отсутствие гальванической развязки в коммутируемой цепи.

Ключи обладают односторонней проводимостью тока и способны работать при напряжении одной полярности, за исключением отдельных интегральных или гибридных приборов, сочетающих качества различных полупроводниковых элементов. В состоянии высокой проводимости прямое падение напряжения на ключе составляет не менее 0,5–0,7 В (до 3 В), что обусловлено контактной разностью потенциалов на границе полупроводниковых слоёв. Это приводит к существенным потерям мощности, преобразующейся в теплоту, и необходимости применения охладителей.

Для электронных аппаратов характерны невысокая устойчивость к электрическим перегрузкам; требуются специальные схемотехнические решения по защите ключей от перегрузок по напряжению и току, а также по скорости нарастания тока  $di/dt$  и напряжения  $du/dt$ . В схемах возможны ложные переключения от случайных импульсов с малой продолжительностью, которые могут проникнуть в цепь управления ключом при близких ударах молний, дуговых разрядах в контактных аппаратах, электросварке и т.д.

В связи с этим необходимо заметить, что силовые электронные аппараты не могут заменить большинства видов электромеханических, так как уступают последним в качестве коммутационных ключей. Силовые электронные ключи по принципу действия не обеспечивают такого низкого уровня потерь мощности во включенном состоянии, как металлические контакты и, с другой стороны, не способны создать уровень изоляции, соответствующий разомкнутым контактам электрического аппарата.

Более эффективными оказываются **гибридные электрические аппараты**, представляющие собой компромиссное техническое решение, соединяющее положительные качества электромеханических и силовых электронных аппаратов в одном комбинированном устройстве. Существенным преимуществом гибридных аппаратов является практическое



исключение дуговых явлений при включении и выключении электрических контактов. Это позволяет продлить срок их службы и в ряде случаев улучшить массогабаритные показатели аппаратов в целом. Другим существенным достоинством гибридных электрических аппаратов является возможность сочетания в одном аппарате функций регулятора на интервалах включения и выключения с высокими характеристиками коммутационного аппарата.

Использование достижений микропроцессорной техники в электронных аппаратах позволяет существенно расширить их функциональные возможности, обеспечить эффективный контроль и диагностику, а также возможность управления с различных иерархических уровней системы, в которой используется аппарат.

На основе СПП могут быть выполнены коммутационные и защитные аппараты постоянного и переменного тока низкого и высокого напряжения в широком диапазоне изменения номинальных токов и напряжений. Поэтому в самом общем виде их можно классифицировать по тем же признакам, что и электромеханические аппараты (по назначению, роду тока, номинальному напряжению, конструктивным особенностям и др.).

### **5.1.3. Классификация электронных аппаратов**

Универсальность применения в многообразии вариантов исполнения полупроводниковых и комбинированных аппаратов позволяет про-  
извести их **классификацию по принципу действия**.

*Аппараты с естественной коммутацией* предназначены для работы в сетях переменного тока. Отключение их осуществляется за счет изменения полярности напряжения источника питания, в результате чего к тиристорам прикладывается обратное напряжение и они выключаются. При этом не требуется каких-либо дополнительных схемных или других решений, кроме необходимости блокировать поступление управляющих сигналов на входы тириستоров. Принцип естественной коммутации используется во всех полупроводниковых и комбинированных аппаратах переменного тока: контакторах, пускателях, переключателях, выключателях нагрузки и выключателях при оперативном отключении номинальных токов.

Процесс отключения *аппаратов с искусственной коммутацией* тоже связан с изменением знака напряжения на СПП и поддержанием сигнала обратного смещения на время, достаточное для их выключения. Но в данном случае это достигается вспомогательными схемными средствами, с помощью которых обеспечивается снижение вводного тока в СПП до нуля. В силовых аппаратах применяется в основном емкостная искусственная коммутация в различных вариантах.

Все реализующие этот способ схемы содержат конденсатор, ток разрядки которого протекает в процессе отключения аппарата встречно анодному коммутируемому току в тиристорах. В группу аппаратов, где используется искусственная коммутация, входят все аппараты постоянного тока и защитные полупроводниковые аппараты переменного тока (выключатели низкого и высокого напряжения, аппараты устройств автоматического включения резерва – АВР).

Особенность *комбинированных аппаратов* состоит в том, что процесс отключения их протекает в два этапа. В течение первого этапа за счет схемных средств или воздействия на электрическую дугу осуществляется принудительный переход тока из контактной цепи в параллельно соединенную с ней полупроводниковую цепь. На втором этапе происходит прерывание тока полупроводниковой частью аппарата с использованием, как правило, принципа естественной коммутации.

По аналогии с электромеханическими аппаратами комбинированные аппараты разделяются на синхронные и несинхронные, в зависимости от режима размыкания контактной цепи: в определенном интервале времени перед нулем тока или в любой момент времени.

К группе *аппаратов с фазовым регулированием* относятся аппараты переменного тока с естественной и искусственной коммутацией, выполняющие дополнительно функцию регулирования выходной мощности. Силовые части аппаратов с фазовым регулированием и без регулирования не имеют различий. Режим регулирования обеспечивается системой управления, с помощью которой осуществляется задержка включения тиристорov на заданный угол по отношению к нулю тока.

В приведенной классификации не выделены в отдельную группу полупроводниковые аппараты на запираемых тиристорах. По характеру протекающих процессов, при отключении, они аналогичны электронным аппаратам с искусственной коммутацией, поэтому их следует рассматривать в составе этой группы, хотя внешний коммутирующий контур значительно меньшей мощности воздействует на анодную цепь тиристорov не непосредственно, а через управляющую цепь.

Представленная классификационная схема раскрывает возможность создания одинаковых по назначению аппаратов с использованием различных принципов действия. Например, контакторы или пускатели, в зависимости от конкретных условий работы и требований к характеристикам, могут быть выполнены как комбинированные аппараты, тиристорные (полупроводниковые) аппараты с естественной коммутацией, тиристорные аппараты с естественной коммутацией и фазовым регулированием.

#### 5.1.4. Требования, предъявляемые к электронным аппаратам

Несмотря на ряд принципиальных особенностей, полупроводниковые и комбинированные аппараты являются одним из видов электрических аппаратов и поэтому должны удовлетворять всем **требованиям**, которые к ним предъявляются. Конкретные требования определяются функциональным назначением аппаратов и условиями их эксплуатации.

Все без исключения аппараты должны иметь по возможности малые габариты, массу и стоимость. Они должны также обладать высокой надежностью и не требовать больших затрат на обслуживание в процессе эксплуатации.

Вместе с тем чувствительность полупроводниковых аппаратов даже к кратковременным перегрузкам по току и напряжению, особенности управления силовыми блоками и их охлаждение обязывают учитывать при проектировании ряд специфических требований.

К наиболее важным из них относятся следующие: обеспечение быстродействующей защиты СПП от перенапряжений, токов перегрузки и короткого замыкания; ограничение до допустимых значений скорости нарастания прямого напряжения; ограничение скорости нарастания тока при включении СПП; обеспечение оптимальных параметров управляющих импульсов; обеспечение оптимальных условий охлаждения полупроводниковых приборов.

Выполнение перечисленных требований позволяет реализовать те преимущества полупроводниковых и комбинированных аппаратов, которые были рассмотрены, и обеспечить высокий уровень надежности их при общем сроке службы более 10 лет. При этом коммутационный ресурс может быть доведен до 10 млн циклов и более.

### 5.2. Гибридные электрические аппараты

#### 5.2.1. Понятие *гибридный аппарат*

Стремление совместить в аппаратах положительные свойства контактных аппаратов (малые потери мощности и габариты) и полупроводниковых (повышенная коммутационная износостойкость, меньшие эксплуатационные затраты и бездуговая коммутация) привело к созданию **гибридных (комбинированных) аппаратов**, в которых ток во включенном состоянии аппарата проходит через контакты, а коммутация его выполняется силовыми полупроводниковыми приборами, включенными параллельно контактам. Таким образом, гибридные электрические аппараты представляют собой комбинацию электромеханических и статических аппаратов.

Сочетание электромеханических контактов с электронными приборами позволяет повысить скорость коммутации, исключив при этом частично или полностью появление дуги, и одновременно уменьшить тепловыделение во включенном состоянии за счет шунтирования полупроводниковых *p-n*-переходов металлическим контактом с малым контактным сопротивлением.

В гибридных аппаратах ток во включенном состоянии аппарата проходит через контакты, а коммутация его выполняется мощными полупроводниковыми приборами, включенными параллельно контактам.

Гибридные аппараты имеют повышенные значения надежности и долговечности при меньших габаритных размерах и повышенном быстродействии, отличаются коммутационной износостойкостью и уменьшенными массой и габаритами по сравнению с электромеханическими. Кроме того, они обладают более широкими функциональными возможностями, так как полупроводниковые элементы могут использоваться для регулирования напряжения (тока) в переходных режимах по заданной системой управления программе.

Бесконтактный коммутатор повышает коммутационную способность главных контактов, так как падение напряжения на включенном тиристоре ниже напряжения поддержания горения дуги, и существенно уменьшается эрозия контактов.

Например, гибридные модификации известных электромагнитных контакторов позволяют повысить номинальный рабочий ток в тяжелых режимах на 30–50 %, коммутационная износостойкость повышается в 25 раз.

В качестве электронных ключевых компонентов в современных гибридных аппаратах используются преимущественно тиристоры. При этом, как правило, применяется их естественная коммутация. При включении контактора последовательно включаются: вспомогательный контакт ВК, один из тириستоров (в зависимости от полярности мгновенного значения напряжения) и главный контакт ГК.

Управление тиристорами гибридного аппарата в общем случае осуществляется системой управления СУ, схемотехника которой определяется функциями аппарата. Для выполнения простейших функций (включения и отключения) СУ может быть реализована на основе нескольких элементов без использования отдельных источников питания и типовых функциональных узлов электронной автоматики.

### 5.2.2. Принцип действия и схемы гибридных аппаратов

*Принцип действия гибридных аппаратов* рассмотрим на простых устройствах (рис. 80), в которых используются диоды и тиристоры. Во всех приведенных силовых блоках СПП соединяются параллельно с одним из размыкаемых контактов. Так как в электромеханических аппаратах падение напряжения на замкнутых контактах при номинальных токах не превышает десятых долей вольта, СПП, соединенные параллельно с контактами, не переходят в состояние высокой проводимости и ток нагрузки через них практически не протекает.

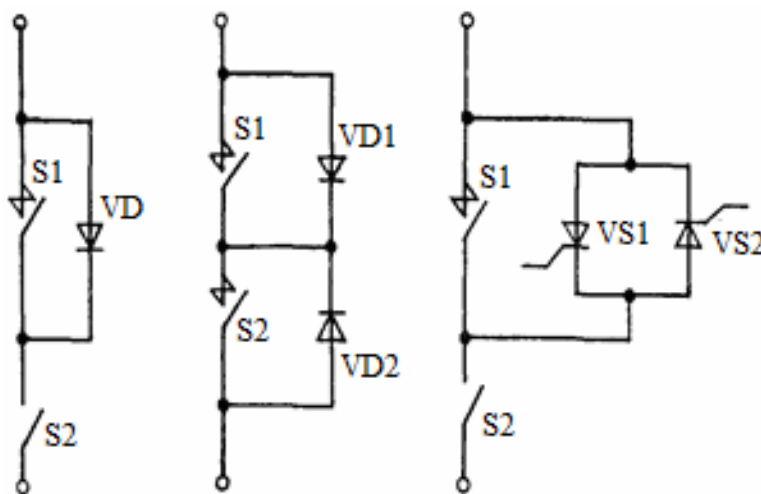


Рис. 80. Силовые блоки комбинированных аппаратов

В процессе отключения аппарата соотношение сопротивлений контактной и полупроводниковой цепей изменяется, что приводит к перераспределению тока между ними. Сущность этого явления рассмотрим на примере отключения аппарата, выполненного по схеме рис. 80, *а*. Размыкание дугогасительных контактов S1 в схеме необходимо обеспечить в начале полупериода тока, полярность которого совпадает с проводящим направлением диода VD (в интервале времени  $t_2 < t < t_3$ , рис. 81).

В этом случае напряжение на образующейся электрической дуге является прямым для диода. По мере увеличения расстояния между контактами и интенсивности воздействия на электрическую дугу, например за счет перемещения ее в воздухе с большой скоростью под воздействием электромагнитного поля, сопротивление межконтактного промежутка растет и, следовательно, повышается напряжение на диоде.

В результате создаются условия для переключения его в проводящее состояние. Практически переход диода в проводящее состояние в аппаратах низкого напряжения происходит уже на стадии образования

электрической дуги, так как приэлектродное падение напряжения на ней намного превышает пороговое напряжение СПП. С этого момента времени ток в контактной цепи  $i_S$  начинает быстро уменьшаться, а ток в полупроводниковой цепи  $i_{VD}$  нарастает. Длительность переходного процесса, в течение которого коммутируемый ток полностью переходит в цепь диода и электрическая дуга гаснет, определяется в основном индуктивностью контуров, динамическими характеристиками используемого диода, способом воздействия на электрическую дугу.

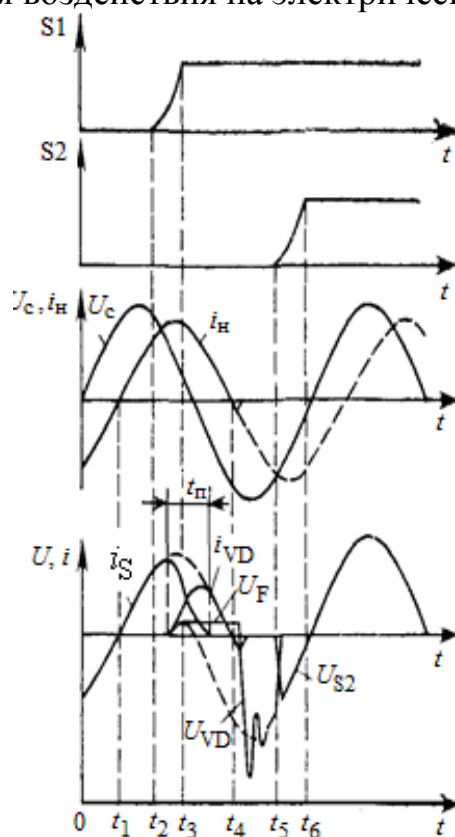


Рис. 81. Диаграммы коммутационных процессов в гибридном аппарате

В оставшееся до конца полупериода время  $t = t_4 - t_3$  завершаются деионизационные процессы в межконтактном промежутке, восстанавливается его электрическая прочность.

Окончательное прерывание тока в цепи осуществляется диодом непосредственно за моментом времени  $t_4$ , соответствующим изменению направления тока. В течение времени, пока напряжение является обратным для диода, необходимо разомкнуть вспомогательные контакты  $S2$ .

Необходимо отметить, что для рассматриваемого случая отключения цепи с активно-индуктивной нагрузкой это время меньше полупериода. В пределе оно может быть равным 5 мс, что приводит к необходимости использования быстродействующих приводов.

При включении аппарата последовательность замыкания контактов должна быть обратной: в непроводящий для диода полупериод напряжения необходимо замкнуть контакты отделителя S2, а в течение следующего полупериода – дугогасительные контакты S1.

Характерным для режима включения является замыкание контактов S1 при малых напряжениях, определяемых падением напряжения на проводящем диоде. Вследствие этого исключаются предварительный пробой промежутка при сближении контактов и связанные с ним явления эрозии и сваривания контактов.

Но надо иметь в виду, что в комбинированных аппаратах существует опасность проявления этих же эффектов из-за высокой скорости нарастания тока в контактах после их соприкосновения. Поэтому конструкции контактного устройства и привода должны обеспечивать форсированное увеличение контактного нажатия до конечного значения.

Аппараты, выполненные по схеме на рис. 80, б, по принципу действия, характеру протекающих процессов не отличаются от рассмотренных выше. Однако наличие двух диодных цепей с встречно-ориентированной проводимостью позволяет осуществлять отключение в любой полупериод тока. В результате сокращается время отключения аппарата.

К недостаткам этого варианта относятся увеличение вдвое числа СПП и усложнение конструкции механической части аппарата. Так как синхронизированное размыкание контактов осуществляется в последовательности, определяемой направлением тока в момент подачи команды на отключение, аппарат должен содержать два независимых и быстродействующих привода. Высокие требования предъявляются также к стабильности срабатывания приводов (они должны обладать малым разбросом времени). Очевидно, что достижение высокого уровня функциональной надежности при таком исполнении силовой части аппарата представляет сложную задачу.

Значительное упрощение приводного механизма и аппарата в целом можно получить при отказе от синхронизации размыкания контактов с соответствующим полупериодом тока. В этом случае оба контакта, управляемые общим приводом, размыкаются одновременно и в любую фазу тока. В результате на обеих контактных парах возникает электрическая дуга, но на одной из пар она гаснет из-за проявления шунтирующего действия диодной цепи. На других контактах, направление тока

в которых не совпадает с проводящим направлением диодов в шунтирующей цепи, электрическая дуга поддерживается до конца полупериода (до изменения направления тока).

Максимальная длительность воздействия дуги на контакты, равная примерно 11 мс, соответствует наиболее неблагоприятному режиму, когда размыкание контактов происходит в относительно узком интервале времени перед прохождением тока через нуль.

В этом случае процесс перехода тока из контактной цепи в диодную не завершается или не успевает восстановиться электрическая прочность межконтактного промежутка, он вновь пробивается в начале следующего полупериода.

При большом числе отключений размыкание контактов S1 и S2 происходит с равной вероятностью как в интервале положительного, так и в интервале отрицательного полупериодов; тот же закон определяет распределение момента размыкания контактов в пределах каждого полупериода. В результате длительность воздействия электрической дуги на контакты уменьшается и, как следствие, увеличивается коммутационный ресурс аппарата. Причем, по сравнению с аналогичными аппаратами без шунтирующих диодных цепей, в которых гашение электрической дуги обеспечивается за один полупериод, увеличение ресурса составляет не менее 150 %.

Возможности комбинированных аппаратов могут быть существенно расширены при замене неуправляемых СПП тиристорами (рис. 80, в).

Полупроводниковая цепь в этом аппарате, выполненная по схеме со встречно-параллельным соединением тиристорov, подключена параллельно только одним дугогасительным контактам. Но способность тиристорov находиться в закрытом состоянии при напряжении положительной полярности позволяет производить коммутационные операции в любой полупериод напряжения (тока).

Рассмотрим взаимодействие контактного узла и тиристорного блока в режиме включения аппарата. Учитывая большое различие в быстрействии контактной цепи и СПП, команды на их включение надо выдавать не одновременно. Сначала должна поступить команда на включение привода контактов. По истечении определенного времени, равного собственному времени включения контактного аппарата, его контакты S1 замыкаются. На рис. 82 момент соприкосновения контактов соответствует времени  $t_2$ .

С необходимым упреждением этого момента времени системой управления выдается управляющий импульс  $I_{G1}$  на тиристор VS1, для которого напряжение в рассматриваемом полупериоде является пря-



мым. В результате включения тиристора напряжение на сходящихся контактах снижается до значения падения напряжения на тиристоре в проводящем состоянии, т.е. до 1,5–2,5 В.

После соприкосновения контактов тиристорная цепь быстро обесточивается, так как сопротивление контактной цепи намного меньше дифференциального сопротивления тиристора.

При отключении аппарата последовательность работы контактной и тиристорной цепи та же, что и в контактно-диодных аппаратах. Отличие состоит только в том, что в момент времени размыкания контактов ( $i_S$  на рис. 82) на тиристор VS2 должен поступить управляющий импульс тока  $I_{G2}$ . Практически реализовать жесткую синхронизацию работы системы управления тиристорным блоком с приводным механизмом контактов очень сложно. Поэтому в большинстве коммутационных устройств такого типа управляющие импульсы на входы тиристоров подаются с упреждением размыкания контактов, учитывающим нестабильность работы во времени механической части аппарата.

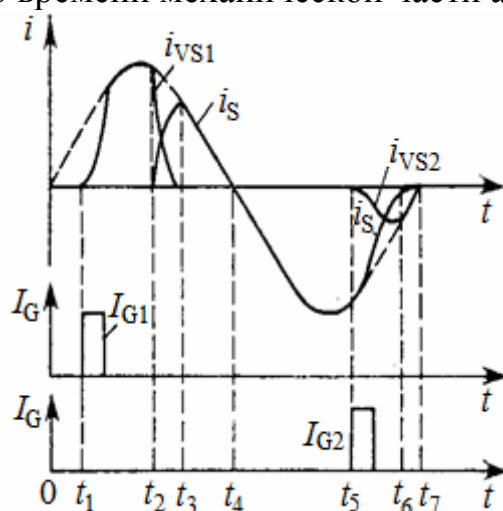


Рис. 82. Переходные процессы в гибридном аппарате

Как и при использовании диодов, в контактно-тиристорных аппаратах размыкание контактов и восстановление электрической прочности межконтактного промежутка должны завершаться до окончания полупериода. Если конструкция аппарата не обеспечивает синхронизированное отключение, контакты могут разомкнуться в любой момент времени, в том числе и в критической зоне полупериода перед прохождением тока через нуль, в котором ток не успевает перейти из контактной цепи в полупроводниковую. В этом случае необходимо, чтобы в начале следующего полупериода системой управления обеспечивалось включение тиристора с другим направлением проводимости.

Обобщая рассмотренные возможности создания комбинированных аппаратов, можно выделить наиболее *важные их характеристики*:

1. Во всех вариантах исполнения комбинированных аппаратов СПП (диоды или тиристоры) при длительном номинальном режиме не проводят ток, поэтому исключаются относительно большие потери мощности, характерные для полупроводниковых аппаратов. Следовательно, по этому показателю комбинированные аппараты не отличаются от обычных контактных.

2. В режимах изменения аппаратом коммутационных положений с помощью СПП осуществляется шунтирование межконтактных промежутков малым сопротивлением, свойственным для диодов и тиристоров в проводящем состоянии. Этим обеспечивается быстрое гашение электрической дуги, возникающей в процессе включения из-за дребезга контактов и при отключении аппарата. Опыт эксплуатации комбинированных аппаратов показывает, что при коммутации токов до 500 А длительность горения дуги не превышает 100 мкс. В результате комбинированные аппараты обладают коммутационной износостойкостью, в 20–50 раз большей, чем контактные.

3. Так как СПП в комбинированных аппаратах подвергаются кратковременному воздействию тока, имеется возможность максимально использовать их импульсную перегрузочную способность. При начальной температуре структуры  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$  большинство приборов допускает нагрузку однополупериодным импульсом тока синусоидальной формы длительностью 10 мс с амплитудой, превышающей значение среднего (классификационного) тока в 8–10 раз. Например, диоды типа Д253-1600 способны выдерживать ток без ухудшения характеристик с амплитудой 12 кА. С уменьшением длительности импульса до 2 мс допустимая амплитуда тока возрастает примерно в три раза. В аварийных режимах, число которых за время работы СПП должно ограничиваться единицами, амплитуда тока увеличивается соответственно до 28 кА при длительности импульса 10 мс и до 44 кА – при 2 мс.

Во многих случаях указанная перегрузочная способность достаточна для создания комбинированных аппаратов без параллельного соединения приборов в силовых блоках. При обеспечении размыкания контактов непосредственно перед критической зоной полупериода тока достигается наилучшее использование импульсной нагрузочной способности СПП.

4. Важным обстоятельством является и то, что при кратковременных токовых воздействиях выделяющаяся теплота в структуре СПП не распространяется за пределы элементов конструкции, непосредственно к ней прилегающих. Поэтому отпадает необходимость не только

в применении принудительного охлаждения, но и в самих охладителях. В результате существенно упрощается конструкция полупроводникового блока, уменьшаются его масса и габариты.

Отмеченные положительные особенности комбинированных аппаратов определили интенсивное их развитие.

К настоящему времени разработаны и выпускаются промышленностью несколько вариантов таких аппаратов, отличающихся как по конструктивному исполнению контактных и полупроводниковых частей, так и по способу управления тиристорами.

Схема одного из вариантов гибридного контактора с системой управления, питающейся от трансформатора тока, приведена на рис. 83.

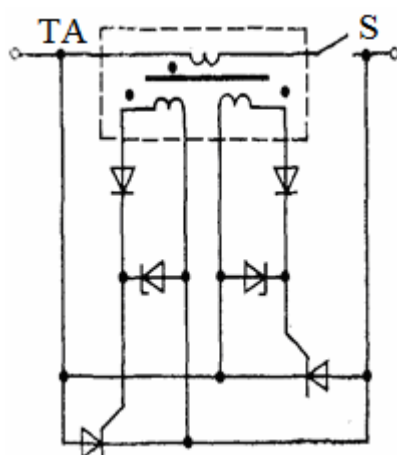


Рис. 83. Схема гибридного контактора

Полупроводниковый блок в ней подсоединен параллельно цепи, состоящей из контактов  $S$  и последовательно включенной с ними первичной обмотки трансформатора тока  $TA$ . Две вторичные обмотки трансформатора через диоды, согласующие полярность управляющего и анодного напряжения, замкнуты на управляющие цепи тириستоров. При включенных контактах  $S$  через них и первичную обмотку трансформатора тока протекает синусоидальный ток.

Во вторичных обмотках трансформатора ток в общем случае будет несинусоидальным из-за нелинейности сопротивления управляющей цепи тиристоров и влияния стабилитронов, которые защищают эти обмотки от превышения допустимого напряжения. При номинальном токе в цепи контакторов тиристоры не должны включаться. Это обеспечивается выбором параметров таким образом, чтобы суммарное падение напряжения на первичной обмотке трансформатора и замкнутых контактах не превышало пороговое напряжение используемых силовых тиристоров.

При протекании сквозных токов короткого замыкания напряжение между точками присоединения тиристорного блока к главной цепи значительно увеличивается и создаются условия для включения тиристор. Поэтому тиристоры необходимо выбирать с учетом этого режима работы.

При размыкании контактов между ними возникает электрическая дуга с напряжением  $U_d > 10$  В, что обеспечивает быстрый переход коммутируемого тока в цепь тиристора и последующее прерывание его в конце полупериода.

Из-за существующего небольшого угла сдвига фаз между током в контактной цепи и в цепи тиристор может наблюдаться задержка включения тиристор, если контакты расходятся в самом начале или в конце полупериода тока. Этот же эффект проявляется и из-за относительно медленного нарастания управляющего тока в начале полупериода, что было рассмотрено выше.

К преимуществам рассмотренной схемы следует отнести повышенную надежность, которая обусловлена минимальным числом элементов; простоту, защищенность от воздействия внешних магнитных полей, автономность питания управляющих цепей, исключение повреждения тиристор при резком увеличении сопротивления контактов, так как при этом блокируется поступление управляющих сигналов на тиристоры. Все эти факторы определили широкое применение схемы. В частности, она используется в серийно выпускаемых контакторах КТП64, КТП65 и др.

### **5.3. Электронные аппараты низкого напряжения**

#### **5.3.1. Электронные аппараты постоянного тока на тиристорах**

Переключение тиристора в проводящее состояние осуществляется подачей на его вход управляющего сигнала с определенной длительностью и амплитудой. После снятия управляющего импульса тиристор остается включенным неограниченно долго, если ток в анодной цепи его не снижается до величины, меньшей тока удержания, поэтому при использовании тиристор в качестве коммутирующих элементов не только для замыкания, но и для размыкания цепей постоянного тока необходимо прибегать к искусственным мерам, обеспечивающим кратковременное прерывание тока в анодной цепи тиристор или уменьшение его до необходимых значений.

Практически это может быть реализовано с помощью простых схем, приведенных на рис. 84. В схеме (рис. 84, а) отключение тока на-

грузки осуществляется размыканием механического контакта  $S1$ , включенного последовательно с тиристором  $VS$ . По истечении времени, достаточного для восстановления управляемости тиристором, контакт  $S1$  может быть вновь замкнут. Цепь при этом остается разомкнутой, так как тиристор находится в выключенном состоянии. Аналогично схема работает при кратковременном шунтировании тиристора замыкаемым контактом  $S2$ , подсоединение которого показано штриховыми линиями.

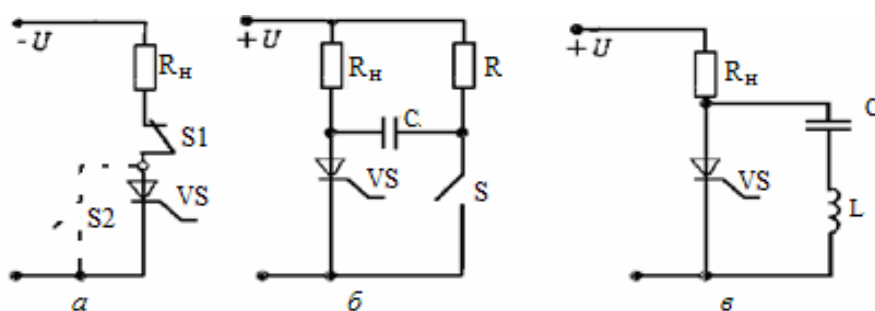


Рис. 84. Схемы тиристорных аппаратов постоянного тока

В обоих случаях через механические контакты протекает полный ток нагрузки, и они должны быть на него рассчитаны. Недостатком подобных схем является также то, что тиристоры в них при возврате контактов в исходное состояние подвергаются воздействию прямого напряжения с высокими значениями  $du/dt$ .

Улучшенным вариантом исполнения коммутационного устройства является схема, приведенная на рис. 84, б.

Последовательность ее работы такова. В исходном состоянии тиристор закрыт, напряжение на нагрузке  $R_H$  и конденсаторе  $C$  отсутствует. Включение схемы осуществляется управляющим сигналом, который необходимо подать на вход тиристора. При этом одновременно с током нагрузки через тиристор протекает ток зарядки конденсатора. Конденсатор заряжается с указанной на рисунке полярностью за время, определяемое постоянной времени цепи.

Последующим замыканием контакта  $S$  заряженный практически до напряжения источника питания конденсатор  $C$  подключается параллельно тиристор. Он начинает разряжаться. Причем ток разрядки протекает через тиристор в направлении, противоположном анодному току.

При превышении током конденсатора анодного тока создаются условия для выключения тиристора и, следовательно, обесточивания нагрузки. Такой способ выключения тиристора, называемый принудительным (искусственным), емкостным, является предпочтительным, так

как позволяет уменьшить время восстановления управляемости тиристора и скорость приложения напряжения в прямом направлении, непосредственно после коммутации тока.

На рис. 84, в приведена еще одна схема тиристорного аппарата, иллюстрирующая применение емкостной искусственной коммутации. В отличие от схемы на рис. 84, б конденсатор  $C$  в ней в исходном состоянии заряжен до напряжения источника питания. Поэтому при включении тиристора  $VS$  управляющим импульсом через него начинают протекать ток нагрузки и ток разряда конденсатора (рис. 85). На втором полупериоде колебательной перезарядки конденсатора, когда ток  $i_C$ , направленный встречно анодному току в тиристоре (току нагрузки), становится больше по значению, тиристор выключается. Начиная с этого момента времени, остаточное напряжение на конденсаторе  $C$  действует согласно с напряжением источника питания, поэтому ток нагрузки резко увеличивается, а затем снижается по мере перезарядки конденсатора. Окончательное выравнивание тока в цепи происходит в момент времени  $t_3$  который соответствует окончанию перезарядки конденсатора.

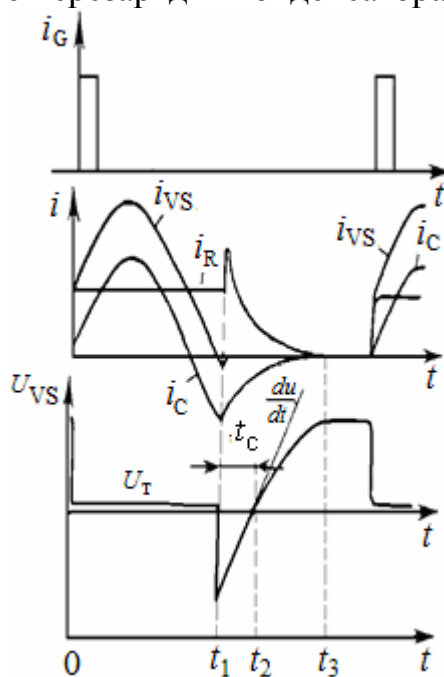


Рис. 85. Временные диаграммы работы схемы

Обратное напряжение на тиристоре поддерживается в течение времени  $t_c = t_2 - t_1$ . Это время называют схемным, так как оно обуславливается параметрами элементов схемы (в данном случае емкостью коммутающего конденсатора  $C$  и индуктивностью катушки  $L$ ).

В рассмотренных схемах (кроме рис. 84, в) прерывание тока обеспечивается, по существу, традиционными контактными аппаратами. Поэтому наличие в них тиристоров не дает никаких преимуществ. Что касается режима включения, то он осуществляется тиристорами, и в этом случае реализуются их возможности по быстродействию, готовности к работе и др.

Основное назначение таких аппаратов – подключение нагрузок с высокой точностью по времени, а также осуществление изменений параметров цепей ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ) при различных экспериментальных исследованиях переходных процессов, автоматическое подключение источников питания. Коммутационное устройство (рис. 84, в), наряду с прерыванием тока в цепи, формирует импульсы тока (мощности). Это может быть использовано для регулирования выходной мощности по заданной программе, которая задается системой управления тиристором.

Принудительная коммутация (выключение) тиристоров является основой работы электронных аппаратов постоянного тока и средством повышения быстродействия при отключении аппаратов переменного тока.

Существуют различные схемные решения, которые обеспечивают кратковременное снижение тока в цепи с тиристорами до нуля и их выключение. Но практическое применение в электрических аппаратах нашли только конденсаторные схемы принудительной коммутации.

Необходимо отметить, что по структуре, определяющей соединение элементов коммутирующего контура и подключение его к выключаемым тиристорам, узлы принудительной коммутации в аппаратах переменного тока и в аппаратах постоянного тока имеют существенные отличия. На рис. 86 представлена схема тиристорного выключателя. Из рисунка видно, что вспомогательный (коммутирующий) тиристор VS2 может быть включен либо от анодного напряжения (замыканием кнопки «Стоп»), либо напряжением, снимаемым с измерительного резистора – шунта  $R_{ш}$ . В последнем случае напряжение на шунте должно превысить значение, равное  $U = U_{GT} + U_F + U_c$ , где  $U_{GT}$  – напряжение управления, достаточное для надежного включения тиристора VS2;  $U_F$  – падение напряжения на диоде VD2 и  $U_c$  – напряжение стабилизации (переключения) стабилитрона VD1.

В аварийных режимах работы, сопровождающихся многократным увеличением тока по отношению к номинальному, отключение цепи осуществляется автоматически при включении тиристора VS2. Регулированием сопротивления  $R_{ш}$  и подбором стабилитрона по параметру  $U_c$  можно заранее задать значение тока перегрузки или тока короткого за-

мыкания (КЗ), при которых произойдет отключение выключателя, причем высокое быстродействие выключателя позволяет прервать ток КЗ задолго до того момента, когда он достигнет максимального значения.

В оперативном режиме включение и отключение номинальных токов производится замыканием управляющих цепей тиристоров VS1 и VS2 соответственно кнопками управления «Пуск» и «Стоп». Ограничение тока в управляющих цепях тиристоров осуществляется резисторами RY.

Работа схемы в этом режиме при активной нагрузке поясняется временными диаграммами (рис. 87).

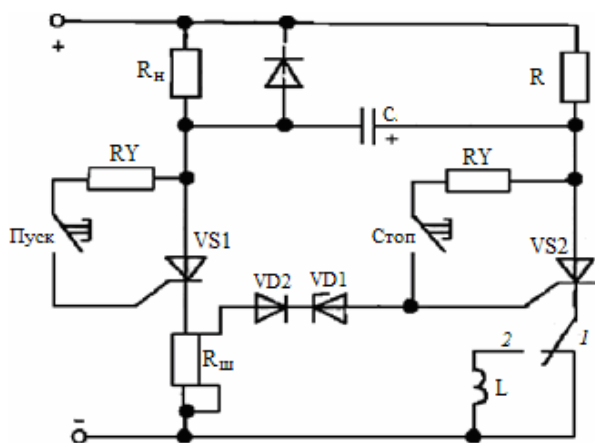


Рис. 86. Тиристорный выключатель

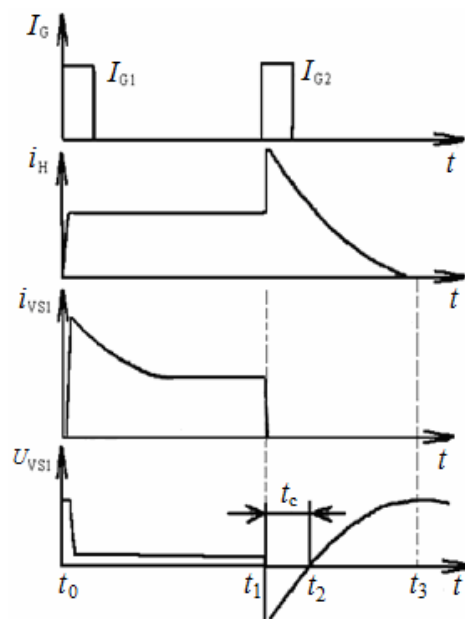


Рис. 87. Процесс отключения выключателя постоянного тока

Особенности, характерные для выключателей с емкостной коммутацией тиристоров, заключаются в следующем:

1. При включении коммутирующего тиристора источник питания и заряженный до напряжения источника конденсатор оказываются соединенными последовательно. Это вызывает скачкообразное увеличение тока в цепи, что неблагоприятно сказывается на нагрузке, особенно при отключении аварийных токов.

2. Интервал времени  $t = t_3 - t_1$ , в течение которого конденсатор C перезаряжается, определяет быстродействие выключателя при отключении и частоту коммутаций. При повторном включении тиристора VS1 конденсатор вновь должен перезарядиться и тем самым обеспечить готовность к последующему отключению аппарата. Для сокращения времени перезарядки конденсатора необходимо уменьшать постоянную



цепи зарядки. Это можно достичь уменьшением сопротивления резистора  $R$ .

3. Процесс отключения тока в цепи нагрузки заканчивается выключением тиристора  $VS2$ . Для этого необходимо обеспечить ограничение тока резистором  $R$  (после перезарядки конденсатора) до значений, меньших тока удержания тиристора. Ввиду того, что ток удержания мощных тиристорov составляет десятки или сотни миллиампер, сопротивление резистора  $R$  должно быть достаточно большим. Чтобы не снизить частоту коммутаций выключателя, зарядка конденсатора осуществляется обычно с помощью дополнительной зарядной цепи с малой постоянной времени от автономного источника питания.

4. Важной задачей при создании выключателей с емкостной коммутацией тиристорov является ограничение перенапряжений, возникающих на конденсаторе. В зависимости от параметров коммутируемой цепи и режима короткого замыкания они могут превышать значение  $(1,5...2)U$ . Для ограничения уровня перенапряжений до приемлемых значений необходимо использовать различные демпфирующие цепи, полупроводниковые или оксидно-цинковые (варисторы) нелинейные ограничители. В некоторых разработках целесообразным становится применение двухконтурных или двухступенчатых коммутирующих узлов, с помощью которых реализуется снижение скорости спада тока в процессе его отключения и существенное уменьшение перенапряжений.

В тиристорных аппаратах с емкостной коммутацией ограничение перенапряжений может быть достигнуто различными способами. Наиболее простой из них заключается в подключении параллельно конденсатору (на определенном этапе его перезарядки) линейного или нелинейного резистора. Сущность такого подхода заключается в демпфировании колебаний за счет увеличения коэффициента их затухания. Эффективность этого способа показана на основе анализа коммутационных процессов в выключателе переменного тока. В выключателях постоянного тока использование линейных резисторов для шунтирования конденсаторов связано с необходимостью введения в схему дополнительного коммутационного узла (обычно тиристорного), обеспечивающего прерывание тока в резисторе.

Один из возможных вариантов исполнения выключателей с двухступенчатой коммутацией тока показан на рис. 88. Готовность к отключению в схеме этого аппарата обеспечивается предварительной зарядкой конденсатора  $C$  от сети с указанной полярностью. Для этого необходимо включить тиристоры  $VS2$  и  $VS5$ , подав на их входные цепи управляющие сигналы. Ток зарядки конденсатора  $C$  протекает через элементы схемы  $L1$ ,  $L2$ ,  $R$ ,  $VS5$ ,  $C$ , перемычку  $\Pi$ ,  $VS2$ ,  $L3$ . По мере за-

рядки конденсатора ток в цепи тиристоров VS2, VS5 уменьшается и, когда он становится меньше тока удержания, тиристоры самостоятельно выключаются. При длительном номинальном режиме напряжение на конденсаторе постепенно уменьшается из-за несовершенства собственной изоляции и вследствие утечки заряда через подключенные к конденсатору цепи с тиристорами.

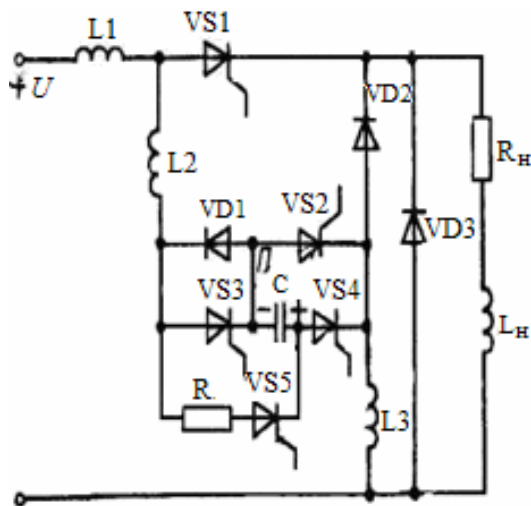


Рис. 88. Тиристорный выключатель с двухступенчатой коммутацией тока

Для предотвращения значительного снижения напряжения система управления должна обеспечивать периодическое включение тиристоров VS2 и VS5. В результате на конденсаторе С будет автоматически поддерживаться постоянное напряжение, равное практически напряжению сети. Реакторы L1, L2, L3 в схеме необходимы для ограничения скорости нарастания тока при включении тиристоров и реализации колебательного режима переходных процессов.

При возникновении короткого замыкания и достижении током значения уставки системой управления включаются тиристоры VS3 и VS4. В результате, как и во всех рассмотренных ранее схемах, выключается тиристор VS1. После изменения полярности напряжения на конденсаторе и повышения его до заданного значения системой управления выдается сигнал на включение тиристора VS5. При этом параллельно конденсатору подключается резистор R, способствующий ограничению дальнейшего повышения напряжения на конденсаторе С. Начиная с этого момента, напряжение на конденсаторе уменьшается вместе с уменьшением коммутируемого тока.

Разрядка конденсатора осуществляется через тиристор VS3, а после его выключения – через диод VD1. Второй этап коммутационных процессов начинается непосредственно после выключения тиристора VS3 и снижения тока до значения, определяемого общим сопротивлением внешней цепи и резистора R.

В этот момент времени системой управления включается тиристор VS2 и ток начинает протекать по цепи R, VS5, C, П, VS2 и VD2. В результате напряжение на конденсаторе вновь изменяет полярность. По достижении им заданного значения ток в нагрузке полностью прерывается.

Так как полярность напряжения на конденсаторе после отключения соответствует исходному состоянию, выключатель готов к повторному срабатыванию. Причем в рассматриваемом случае, который соответствует индуктивному характеру нагрузки, напряжение на конденсаторе значительно превышает напряжение сети. При активной нагрузке остаточное напряжение на конденсаторе и после отключения тока меньше напряжения источника. Для обеспечения готовности к работе конденсатор необходимо дозарядить.

Резистор R в процессе зарядки конденсатора шунтирован диодом, который в данном случае смещен в прямом направлении. Поэтому постоянная времени зарядки конденсатора определяется только сопротивлением соединительных проводов, собственным сопротивлением, индуктивностью конденсатора и дифференциальным сопротивлением диода.

При включении запираемого тиристора конденсатор C, который заряжен до напряжения источника питания, разряжается через резистор R, так как диод VD1 при этом оказывается смещенным в обратном направлении. Таким образом, обеспечивается защита тиристора от превышения допустимой для него скорости нарастания тока при включении. Отметим, что емкость конденсатора защитной цепи, обеспечивающая нормальный режим работы запираемого тиристора в цепи с активной нагрузкой, составляет единицы микрофард.

Резкое прерывание тока запираемым тиристором при отключении индуктивной нагрузки сопровождается не только высокой скоростью восстановления напряжения, но и многократными перенапряжениями. Для ограничения перенапряжений можно использовать защитную цепь с той же структурой. Однако емкость конденсатора в этом случае может составить десятки и даже сотни микрофард.

### 5.3.2. Электронные аппараты переменного тока на тиристорах

По сравнению с коммутационными аппаратами постоянного тока **электронные аппараты переменного тока** имеют более сложную структуру. Принципиальная схема и конструктивное исполнение их определяются назначением, предъявляемыми требованиями и условиями работы. Существует большое многообразие вариантов исполнения электронных аппаратов переменного тока, тем не менее все они могут быть представлены *обобщенной структурной схемой* (рис. 89). В структурной схеме можно выделить четыре функционально законченных узла.

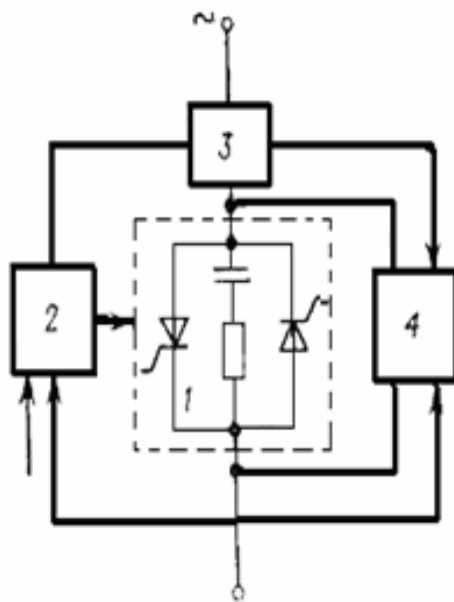


Рис. 89. Структурная схема  
тиристорного аппарата переменного тока

Силовой блок 1 с элементами защиты от перенапряжений является основой коммутирующего устройства, его исполнительным органом. Он может быть выполнен на базе только управляемых вентилей – тиристоров или с использованием диодов. При проектировании аппарата на ток, превышающий предельное значение тока одного прибора, требуется их параллельное соединение. При этом должны приниматься специальные меры, устраняющие неравномерность распределения тока по отдельным приборам, которая обусловлена неидентичностью их вольтамперных характеристик в проводящем состоянии и разбросом времени включения.

Блок управления 2 содержит устройства, которые осуществляют селекцию и запоминание команд, поступающих от органов управления или защиты; формируют управляющие импульсы с заданными параметрами; синхронизируют поступление этих импульсов на входы тиристо-

ров с моментами перехода тока в нагрузку через нуль. Схема блока управления значительно усложняется, если аппарат, кроме функции коммутирования цепей, должен осуществлять регулирование напряжения и тока. В этом случае она дополняется устройством фазового управления, обеспечивающим сдвиг импульсов управления на заданный угол по отношению к нулю тока.

Блок датчиков режима работы аппарата 3 содержит измерительные устройства тока и напряжения, реле защиты различного назначения, схему выработки логических команд и сигнализации коммутационного положения аппарата.

Блок принудительной коммутации 4 объединяет в себе конденсаторную батарею, схему ее зарядки и коммутирующие тиристоры. В аппаратах переменного тока этот блок содержится только при условии использования их в качестве защиты (автоматических выключателей).

Силовая часть аппарата может быть выполнена по схеме со встречно-параллельным включением тиристоров (рис. 89), на основе симметричного тиристора (симистора, рис. 90, а) и в различных сочетаниях тиристоров и диодов (рис. 90, б, в). В каждом конкретном случае при выборе варианта схемы должны учитываться следующие факторы: параметры по напряжению и току разрабатываемого аппарата, число используемых приборов, нагрузочная способность в длительном режиме и устойчивость к перегрузкам по току, степень сложности управления тиристорами, требования к массе и габаритам, стоимость.

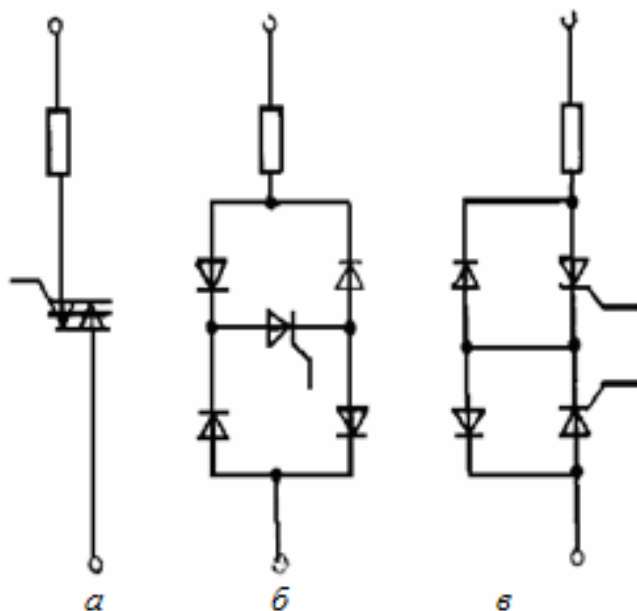


Рис. 90. Силовые блоки аппаратов переменного тока

Наибольшими преимуществами обладает схема со встречно-параллельно включенными тиристорами. Такая схема содержит меньше приборов, отличается меньшими габаритами, массой, потерями энергии и стоимостью. По сравнению с симисторами тиристоры с односторонней (однонаправленной) проводимостью имеют более высокие параметры по току и напряжению, способны выдерживать большие перегрузки по току. Тиристоры таблеточной конструкции обладают более высокой термоциклическостью. Поэтому схему с использованием симисторов можно рекомендовать для коммутации токов, не превышающих, как правило, классификационное значение тока единичного прибора, т.е. когда не требуется групповое их соединение. Отметим, что применение симисторов способствует упрощению системы управления силовым блоком – она должна содержать один выходной канал на полюс аппарата.

Схемы, изображенные на рис. 90, б, в, иллюстрируют возможность проектирования коммутирующих устройств переменного тока с применением диодов. Обе эти схемы отличаются простотой управления, но имеют недостатки, обусловленные применением большого числа приборов. В схеме на рис. 90, б переменное напряжение источника питания с помощью выпрямительного диодного моста преобразуется в двухполупериодное пульсирующее напряжение одной полярности. В результате только один тиристор, включенный на выходе выпрямительного моста (в диагональ моста), становится способным управлять током в нагрузке в течение обоих полупериодов, если в начале каждого полупериода на его вход будут поступать управляющие импульсы. Выключение схемы происходит при ближайшем переходе тока нагрузки через нуль после прекращения генерирования управляющих импульсов.

Следует иметь в виду, однако, что надежное выключение схемы обеспечивается лишь при минимальной индуктивности цепи на стороне выпрямленного тока. В противном случае даже при снижении напряжения в конце полупериода до нуля ток будет продолжать протекать через тиристор, препятствуя его выключению. Опасность аварийного режима работы схемы (невывключение) появляется также при увеличении частоты питающего напряжения. В этом случае может оказаться, что схемное время недостаточно для восстановления тиристором управляемости.

В схеме, представленной на рис. 90, в управление нагрузкой осуществляется двумя встречно включенными тиристорами, каждый из которых шунтирован в обратном направлении неуправляемым вентилем. Так как при таком соединении катоды тиристорov находятся под одним потенциалом, это позволяет использовать генераторы управляющих импульсов с одним выходом или с двумя выходами с общим заземлением. Принципиальные схемы таких генераторов значительно упрощают-

ся. Кроме того, тиристоры в этой схеме защищены от обратного напряжения и, следовательно, должны выбираться только по прямому напряжению.

По габаритам, техническим характеристикам и экономическим показателям устройства, выполненные по схемам, приведенным на рис. 90, б, в, уступают коммутирующим устройствам, схемы которых показаны на рис. 89 и 90, а. Тем не менее они широко применяются в устройствах автоматики и релейной защиты, где коммутируемая мощность измеряется сотнями ватт. В частности, они могут быть использованы в качестве выходных устройств формирователей импульсов для управления тиристорными блоками более мощных устройств.

Особенность электронных коммутационных устройств состоит в том, что они без принципиальных изменений в силовой части могут выполнять различные функции. Так, тиристорный блок, выполненный по схеме на рис. 89, одинаково успешно может работать и в качестве контактора, и в качестве выключателя. Только заменой тиристоров (изменяется тип, класс по напряжению или группа прибора по динамическим параметрам) обеспечивается расширение области применения аппаратов по току или напряжению. Существенно можно повлиять на работу схемы и с помощью системы управления, что будет показано на примере работы тиристорного контактора (рис. 91).

Силовой блок контактора выполнен по схеме с встречно-параллельным соединением тиристоров VS1 и VS2. Управление им осуществляется с помощью цепи, состоящей из резисторов R1, R2, R3 и механического контакта S. Эта цепь подключена параллельно тиристорам, поэтому при замкнутом ключе S напряжение на ее элементах, и в частности на резисторах R1 и R3, изменяется синхронно с анодным напряжением на тиристорах. А так как эти резисторы подключены параллельно управляющим цепям тиристоров, то напряжение одной полярности одновременно нарастает и на аноде тиристора, и на его управляющем электроде.

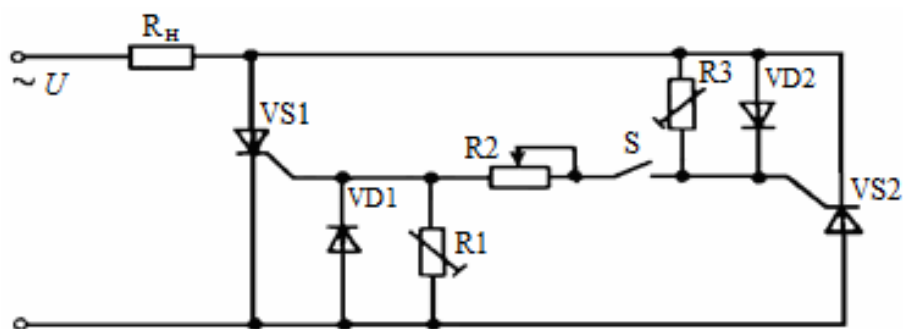


Рис. 91. Тиристорный контактор переменного тока

Если это напряжение является положительным, например по отношению к тиристорам VS1, и снимаемое с резистора R1 напряжение превышает значение отпирающего напряжения, тиристор VS1 включается. При изменении полярности напряжения таким же образом происходит включение тиристора VS2, диоды VD1 и VD2 в схеме необходимы для защиты управляющих цепей тиристоров от обратного напряжения при отрицательном напряжении на их анодах.

Регулируемый резистор R2 в управляющей цепи выбирается из условия ограничения амплитуды импульса тока управления до допустимого для используемых тиристоров значения.

Изменением сопротивления резистора R2 можно управлять током во входных цепях тиристоров и, следовательно, моментом включения их по отношению к началу полупериода напряжения. В результате контактор становится способным выполнять еще одну функцию – регулирование тока в нагрузке.

Рассмотренный способ управления тиристорами является одним из самых простых и надежных, так как реализуется минимальным числом элементов в управляющих цепях. Вместе с тем непосредственная связь управляющего электрода и анода тиристора дает возможность обеспечить выполнение и других требований, которые предъявляются к системам управления: автоматически осуществляется жесткая синхронизация поступления управляющих сигналов с моментом возможного включения тиристоров; потери мощности на управление незначительны, так как длительность воздействия тока управления регулируется самим тиристором. Как только он переключается в проводящее состояние, управляющая цепь оказывается зашунтированной малым сопротивлением (сопротивлением тиристора в проводящем состоянии) и ток в ней уменьшается практически до нуля.

Благодаря отмеченным факторам схемы управления тиристорами с питанием от анодного напряжения широко применяются в аппаратах низкого напряжения. В частности, с использованием этого принципа управления отечественная промышленность выпускает тиристорные станции управления типа БСЭ, регуляторы яркости ламп накаливания, тиристорные пускатели типа ПТ в трехполюсном исполнении на номинальный ток до 63 А.

### 5.3.3. Электронные аппараты на транзисторах

Особенность *транзисторных электронных аппаратов* на постоянном токе по сравнению с тиристорными состоит в лучшей управляемости, большем быстродействии, меньших потерях и упрощении схемы.



Транзисторные ключи по сравнению с тиристорными обладают безусловными преимуществами при напряжении до 30–300 В и токах до сотен ампер.

Для транзисторных коммутаторов характерно совмещение функций коммутации и защиты. Транзисторы весьма чувствительны к нарушению нормальных режимов эксплуатации. Таким образом, осуществляя защиту коммутирующих цепей, они тем самым осуществляют и самозащиту. Защита от токов перегрузки или короткого замыкания в транзисторных выключателях осуществляется путем прекращения передачи открывающего сигнала на базу силового транзистора (для ускорения коммутации в некоторых случаях используют форсировку тока базы при включении и подачу обратного «запирающего» тока в базу при отключении транзистора). Сигнал на отключение поступает при достижении током нагрузки установившегося значения. Датчиком служит обычно шунт, стоящий в цепи эмиттера или коллектора. Одна из возможных схем такого выключателя на биполярных транзисторах приведена на рис. 92.

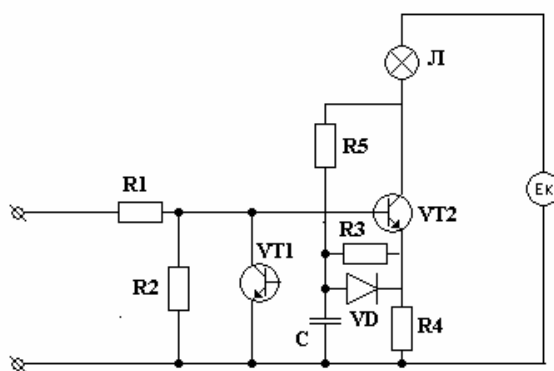


Рис. 92. Схема выключателя постоянного тока на транзисторах

Возможность аппаратов на силовых транзисторных ключах предотвращает развитие больших токов в переходных и аварийных режимах, их надежность и ресурс повышает качество питающего напряжения, облегчает режимы, уменьшает массу и объем обслуживаемых ими устройств.

Транзисторные коммутационные аппараты в настоящее время успешно используются для управления двигателями постоянного тока мощностью до 45 кВт.

Транзисторные коммутаторы могут использоваться и для управления нагрузкой на переменном токе (рис. 93).

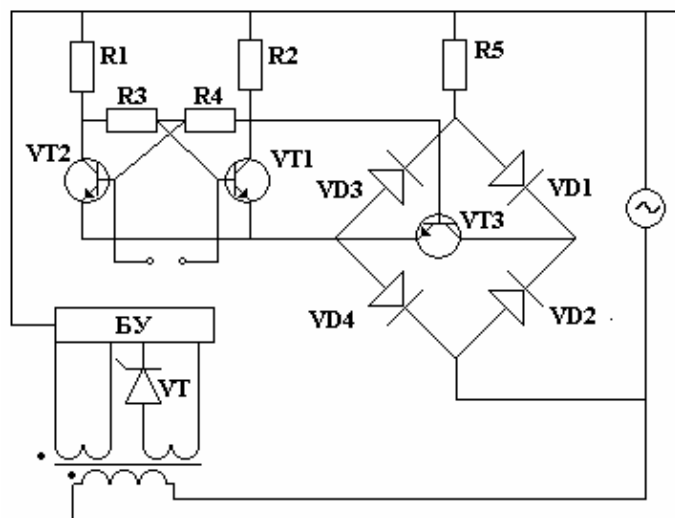


Рис. 93. Схема выключателя переменного тока на транзисторах

Транзистор управляется от симметричного триггера. Отличительная особенность такого выключателя от аналогичного мостового тиристорного состоит в том, что работа его не зависит от характера нагрузки.

Бесконтактные коммутационные аппараты и регуляторы, помимо биполярных транзисторов, выполняются и на полевых МДП или МОП-транзисторах. Аппараты на полевых транзисторах отличаются простотой схемы и конструкции.

#### 5.3.4. Твердотельные реле

**Твердотельное реле (ТТР)** – это класс современных модульных полупроводниковых приборов, выполненных по гибридной технологии, содержащих в своем составе мощные силовые ключи на симисторных, тиристорных или транзисторных структурах.

Твердотельные реле обеспечивают наиболее надежный метод коммутации цепей и обладают следующими *преимуществами* перед электромагнитными аналогами:

- включение цепи без электромагнитных помех;
- высокое быстродействие;
- отсутствие шума и дребезга контактов;
- продолжительный период работы (свыше миллиарда срабатываний);
- возможность работы во взрывоопасной среде, так как нет дугового разряда;
- низкое электропотребление (на 95 % меньше, чем у обычных реле);

- надёжная изоляция между входными и коммутируемыми цепями;
- компактная герметичная конструкция, стойкая к вибрации и ударным нагрузкам.

Твердотельные реле **классифицируют по типу нагрузки** на одно- и трёхфазные с диапазоном регулируемого напряжения от 40 до 440 В.

**По типу управляющего сигнала** ТТР делятся на следующие группы:

- 1) управление напряжением постоянного тока 3...32 В;
- 2) управление напряжением переменного тока 90...250 В;
- 3) ручное управление выходным напряжением с помощью переменного резистора;
- 4) аналоговое управление выходным напряжением с помощью унифицированного сигнала напряжения 0...10 В.

Различные варианты управляющих сигналов позволяют применять ТТР в качестве коммутационных элементов в системах автоматического управления.

**По способу коммутации** различают твердотельные реле с контролем перехода через 0; твердотельные реле мгновенного (случайного) включения; твердотельные реле с фазовым управлением.

**Твердотельные реле с контролем перехода через 0** применяются для коммутации резистивных нагрузок – электрических нагревательных элементов, ламп накаливания и т.п.; емкостных нагрузок (например, помехоподавляющих сглаживающих фильтров, имеющих в своем составе конденсаторы); слабоиндуктивных нагрузок – катушек соленоидов, клапанов и т.п.

При подаче управляющего сигнала на твердотельное реле с контролем перехода через ноль напряжение на его выходе появляется в момент первого пересечения линейным напряжением нулевого уровня (рис. 94). Это позволяет уменьшить начальный бросок тока, снизить уровень электромагнитных помех и, как следствие, увеличить срок службы коммутируемых нагрузок. Однако ТТР с контролем перехода через ноль не могут коммутировать высокоиндуктивную нагрузку (например, трансформаторы на холостом ходу).



Рис. 94. Диаграмма срабатывания ТТР с контролем перехода через ноль

**Твердотельные реле мгновенного (случайного) включения** применяются для коммутации резистивных (нагревательные элементы, лампы накаливания) и индуктивных (маломощные двигатели, трансформаторы) нагрузок при необходимости мгновенного срабатывания.

Напряжение на выходе твердотельного реле данного типа появляется одновременно с подачей управляющего сигнала (время задержки включения не более 1 миллисекунды), а значит, включение ТТР возможно на любом участке синусоидального напряжения (рис. 95). Однако у ТТР данного типа могут возникать импульсные помехи и начальные броски тока при коммутации. После включения такое твердотельное реле функционирует как обычное ТТР с контролем перехода через ноль.



Рис. 95. Диаграмма срабатывания ТТР мгновенного включения

**Твердотельные реле с фазовым управлением** позволяют изменять величину выходного напряжения на нагрузке (рис. 96) и применяются для регулирования мощности нагревательных элементов, уровня освещенности у лампы накаливания и т.д.



Рис. 96. Диаграмма срабатывания ТТР с фазовым управлением

Увеличение температуры ТТР накладывает ограничение на величину коммутируемого тока – нагрев твердотельного реле до 60 °С существенно снижает допустимую величину коммутируемого тока (нагрузка может отключаться не полностью, а само ТТР перейти в неуправляемый режим работы и даже выйти из строя). В связи с этим при длительной работе твердотельного реле в номинальных, и особенно «тяжелых», ре-

жимах (при длительной коммутации и токах нагрузки свыше 5 А) требуется применение радиаторов или воздушного охлаждения для рассеивания тепла. При повышенных нагрузках, например в случае нагрузки индуктивного характера (соленоиды, электромагниты и т.п.), рекомендуется выбирать твердотельное реле с большим запасом по току (в 2–4 раза), а в случае применения твердотельных реле для управления асинхронным электродвигателем необходим 6–10-кратный запас по току. При работе с большинством типов нагрузок включение твердотельного реле сопровождается скачком тока (пусковой перегрузкой) различной длительности и амплитуды, и это необходимо учитывать при выборе твердотельного реле.

**Коммутирующими элементами ТРТ** являются: симисторы, встречно-включенные тиристоры, полевые транзисторы, IGBT. Эти типы приборов имеют идентичную входную схему, выполненную на основе инфракрасного светодиода, излучение которого обеспечивает включение соответствующего силового элемента через специальную фоточувствительную схему, причем для тиристорно-симисторных и MOSFET-IGBT реле применяются разные схемы.

Цепи управления светодиодом выполнены или на резисторе, или с применением токового стабилизатора. Типичный ток управления твердотельным реле составляет 10–15 мА, что на порядок меньше тока управления электромагнитного реле. Различные типы приборов могут управляться как постоянным, так и переменным напряжением.

**Входные схемы реле** представлены на рис. 97 («Ст» означает стабилизатор тока).

При управлении постоянным напряжением входная цепь реле имеет резистивный ограничитель тока (для реле постоянного тока по коммутируемой цепи) или токовый стабилизатор (для реле переменного тока).

Входная цепь реле, управляемых переменным напряжением, имеет на входе АС/DC–преобразователь и токовый стабилизатор.

Твердотельное реле обеспечивает надежную электрическую изоляцию входных и выходных электрических цепей друг от друга, а также токоведущих цепей от элементов конструкции прибора.

Входное напряжение, в зависимости от модификации прибора, составляет: группа А – 3–30 В постоянного тока (для реле переменного тока по коммутируемой цепи); 4–10 В (для реле постоянного тока); группа Б – 6–30 В переменного тока (среднеквадратичное значение); группа В – 90–280 В переменного тока (среднеквадратичное значение).

Максимальное напряжение невключения реле составляет: группа А – 1 В; группа Б – 4 В (среднеквадратичное значение); группа В – 10 В (среднеквадратичное значение).

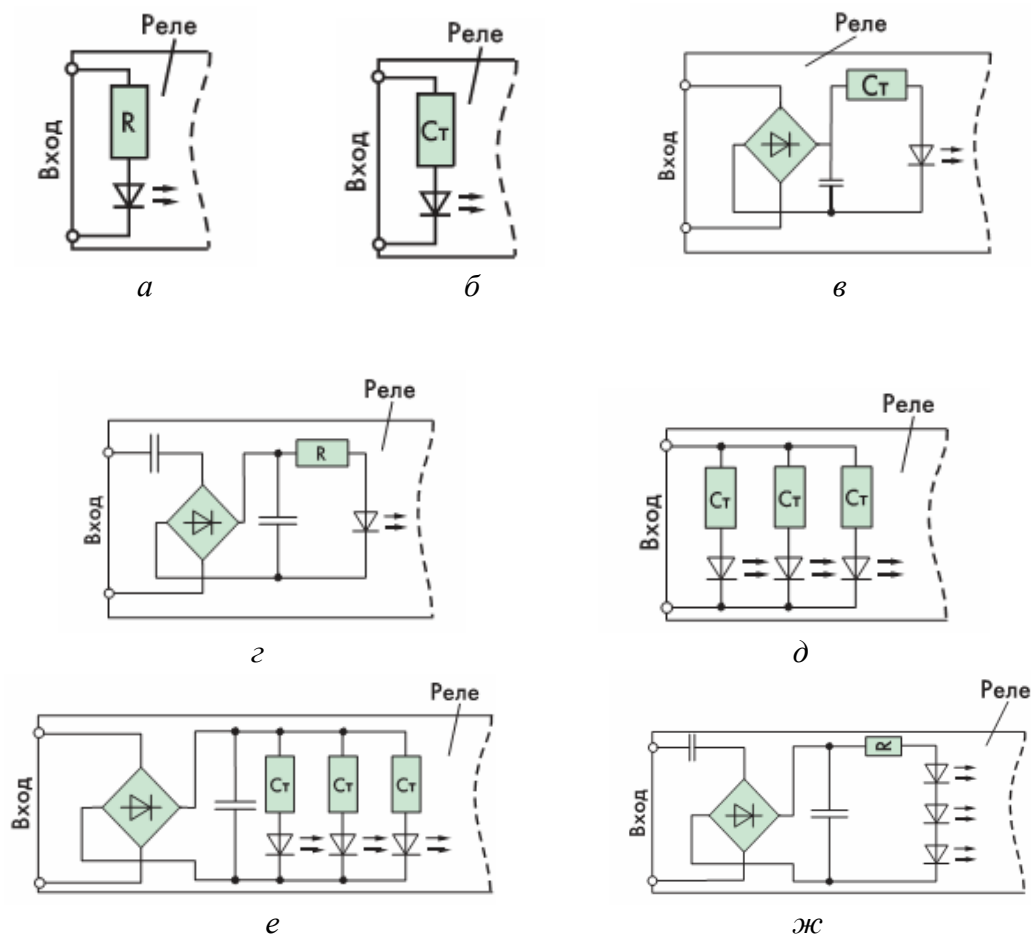


Рис. 97. Входные схемы твердотельных реле:

*а* – реле постоянного тока; *б* – реле переменного тока однофазные с управлением постоянным напряжением; *в* – реле переменного тока однофазные с управлением переменным напряжением; *г* – реле переменного тока однофазные с управлением переменным напряжением; *д* – реле переменного тока трехфазные с управлением постоянным напряжением; *е* – реле переменного тока трехфазные с управлением переменным напряжением; *ж* – реле переменного тока трехфазные с управлением переменным напряжением

Еще одним параметром реле, управляемых постоянным напряжением, является предельно допустимая величина обратного напряжения, составляющая 7 В.

Оптронная развязка твердотельных реле представляет собой сложный электронный прибор. Выходным элементом входной части этой оптронной развязки является светодиод, излучающий в инфракрасном диапазоне. Входным элементом выходной части оптрона являются фоточувствительная электронная схема на основе симистора (для реле переменного тока) или на основе так называемого фотовольтаического элемента, создающего на своих выводах разность потенциалов при облучении инфракрасным излучением.

Структурные схемы реле представлены на рис. 98–104.

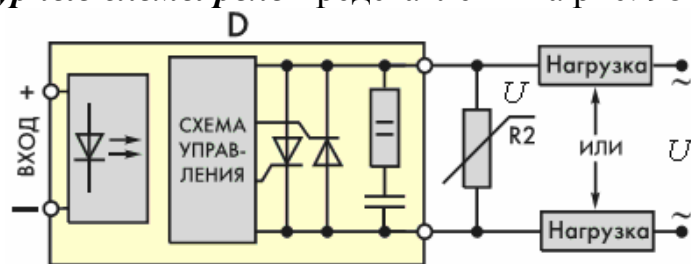


Рис. 98. Реле переменного тока однофазные

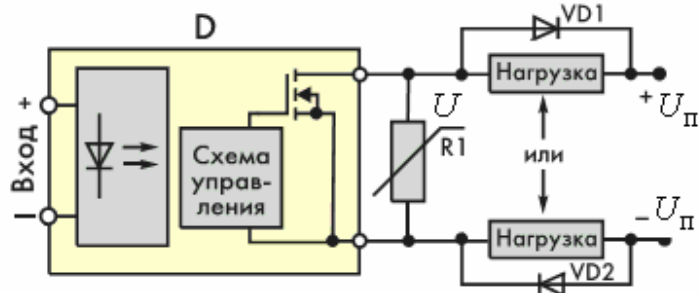


Рис. 99. Реле постоянного тока на полевых транзисторах

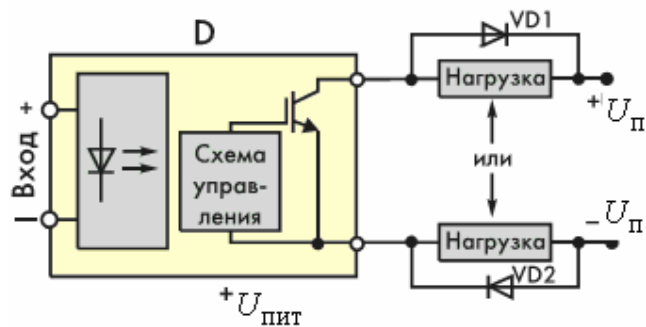


Рис. 100. Реле постоянного тока на IGBT-транзисторах

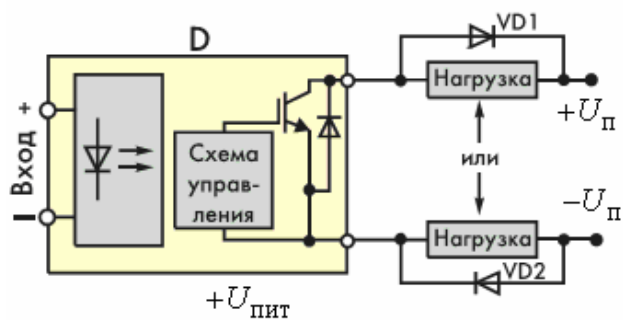


Рис. 101. Реле постоянного тока на IGBT-транзисторах с диодом

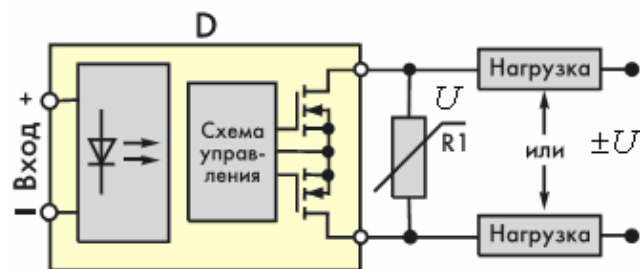


Рис. 102. Реле постоянного тока на полевых транзисторах для коммутации двухполярного напряжения

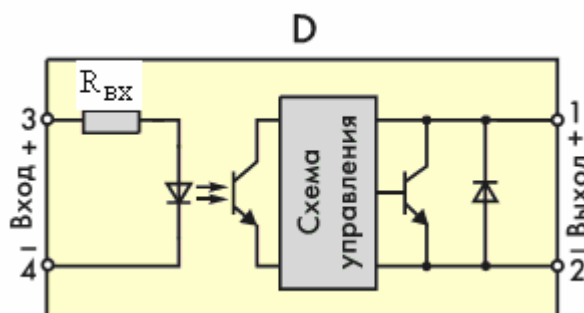


Рис. 103. Реле постоянного тока на биполярных транзисторах

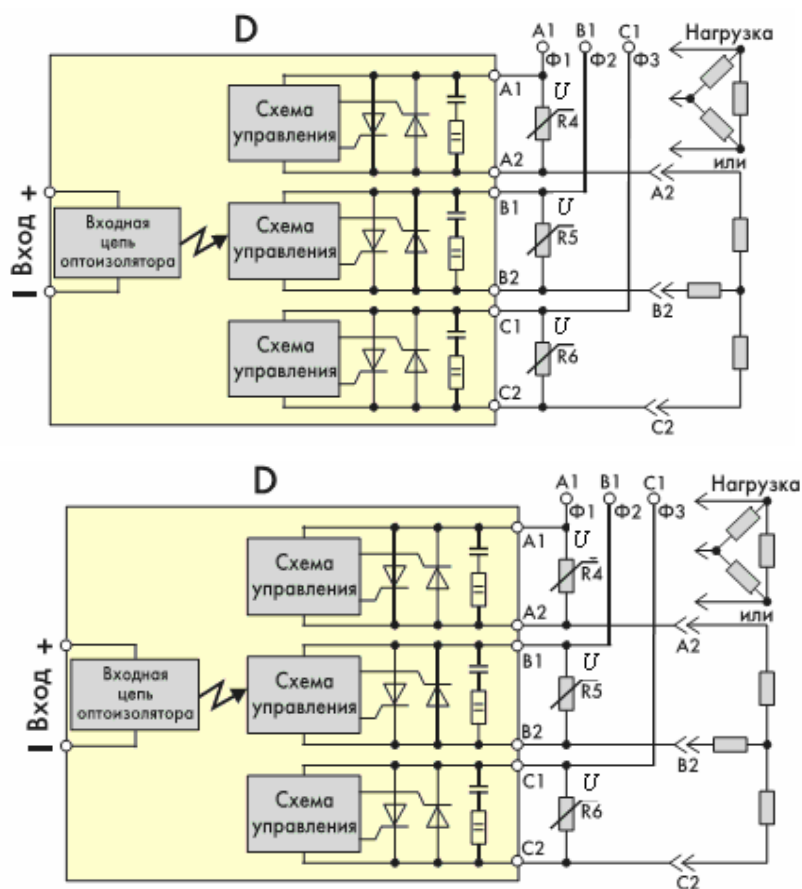


Рис. 104. Реле переменного тока трехфазные



Функциональный элемент однофазного реле переменного тока, подключенный к управляющим электродам выходных тиристоров реле, является по своей сути симистором на полное рабочее напряжение силовой цепи реле с максимальным током (импульсным) до 500 мА. Под воздействием излучения инфракрасного диапазона светодиода входной части реле этот симистор открывается и подает отпирающий ток в управляющие электроды выходных тиристоров реле при поступлении положительной или отрицательной полуволны сетевого напряжения соответственно. Этот элемент включается на короткое время (около 20 мкс), необходимое для отпирания выходного тиристора, в дальнейшем весь ток идет через силовой тиристор реле. Кроме того, этот элемент следит за фазным напряжением в сети.

Существуют две модификации реле переменного тока, отличающиеся характером поведения реле:

- В реле без контроля «нуля» фазы сетевого напряжения или реле с произвольным включением, которые наиболее аналогичны по своим коммутационным свойствам электромагнитным реле, при поступлении управляющего сигнала силовая цепь отпирается сразу за очень короткое время.

- В реле с контролем «нуля» фазы сетевого напряжения (под «нулем» фазы понимается некоторый диапазон напряжений малой величины положительной и отрицательной полуволны сетевого напряжения, при которых может произойти коммутация силовой цепи) специальная схема обеспечивает включение реле при наличии управляющего сигнала в момент времени, близкий к «нулю» фазы. При больших значениях напряжения реле не включится даже при наличии управляющего сигнала. Эта величина напряжения называется напряжением запрета и составляет 40 В для всех реле, независимо от уровня коммутируемого тока.

Реле первого типа могут быть использованы в регуляторах мощности, обеспечивая отсечку фазы силового напряжения регулируемой длительности, системах автоматики и т.д., а у реле второго типа главным преимуществом является «мягкое» включение нагрузки, не порождающее помех в сети и не искажающее форму напряжения на нагрузке.

Реле с произвольным включением, как и электромагнитные реле, могут быть как нормально замкнутыми, так и нормально разомкнутыми, что обеспечивается специальными схемными решениями. Эти реле могут пропустить ток по силовой части без подачи управляющего напряжения и запираются при подаче управляющего сигнала на вход реле.

Таким образом, все реле переменного тока имеют двухкаскадную выходную схему, что накладывает ряд ограничений на допустимые параметры коммутируемой нагрузки.

Выходная часть реле (силовой коммутирующий элемент) построена на паре встречно-параллельно включенных тиристоров.

Твердотельные реле представляют собой сложный прибор, состоящий из большого количества различных элементов, к свойствам и качеству которых предъявляются высокие требования.

Рассмотрим **конструкцию** на примере реле МО8МА, выпускаемого ООО «Электрум АВ».

В основании прибора находится медная пластина с никелевым покрытием и отверстиями для монтажа готового прибора в аппаратуре. Главная функция этой пластины – эффективный отвод тепла, выделяемого на силовых полупроводниковых элементах в процессе работы. Мощность этого тепловыделения определяется падением напряжения на полупроводниковом элементе (тиристоре) и протекающим через него током. Эта величина составляет от 15 Вт (реле 10 А) до 375 Вт (реле 250 А). Тепло передается в окружающую среду через эту пластину (радиатор). Площадь пластины составляет 252 см<sup>2</sup> для реле на токи до 120 А и 702 см<sup>2</sup> для реле на токи до 250 А. Толщина пластины – 3 мм. Медь, используемая при изготовлении радиатора, обладает очень высокой теплопроводностью и обеспечивает хороший съем тепла со всей поверхности радиатора. Однако, в силу относительно небольшой площади радиатора, он не может обеспечить передачу всего тепла в окружающую среду, поэтому при использовании реле при больших уровнях тока (более 5 или 10 А, в зависимости от площади радиатора) реле необходимо устанавливать на специальные охладители.

Конструкция монтажных отверстий в радиаторе позволяет стянуть радиатор с охладителем с необходимым усилием, обеспечивающим высокий уровень теплопередачи.

На радиаторе установлена (напаяна) керамическая пластина. Пластина выполнена из высокотеплопроводной высокоглиноземистой (содержание зерен  $Al_2O_3$  – 98 %) керамики с нанесенными на обеих сторонах медными покрытиями толщиной до 0,5 мм. Эта пластина выполняет три важнейших задачи. За счет высоких диэлектрических свойств она обеспечивает изоляцию силовой цепи реле от радиатора (при толщине 0,6 мм обеспечивается изоляция на уровне 4 кВ действующего значения в течение 1 мин). За счет высокой теплопроводности, обеспечиваемой мелкозернистой структурой, сопоставимой с теплопроводностью меди, обеспечивается высокая теплопередача от кристалла полупроводникового элемента к радиатору, а через него – на охладитель и в окружающую среду. Толстые медные покрытия обеспечивают возможность пропускания больших плотностей тока.

На рис. 105 представлена типовая сборка, содержащая радиатор, керамику и кристаллы тиристоров, установленные на ней.

Соединения кристалла с керамикой и керамики с радиатором производятся специальными мягкими припоями, которые обеспечивают хорошую теплопроводность и являются демпфирующими прокладками, компенсирующими разность ТКР материалов сборки (кремний – медь – керамика). Процесс сборки производится при строгом соблюдении технологических режимов, обеспечивающих необходимый температурный профиль, так как отклонение от них приводит к деформации радиатора, а следовательно, – к браку. Для обеспечения высокой теплопроводности спаев они должны обладать малой толщиной и не иметь просветов. Для обеспечения этого количество припойного материала строго дозируется, а после пайки проводится рентгеновский контроль спаев (допускается на площади 1 кв. см до 5 точечных проколов общей площадью не более 2 кв. мм).

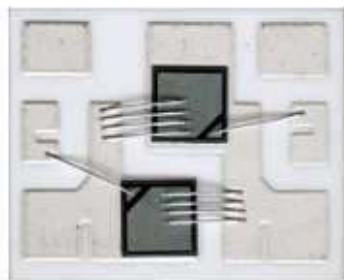


Рис. 105. Типовая сборка радиатора твердотельного реле с установленной на нем керамикой и кристаллами тиристоров



Рис. 106. Внешний вид реле

Кристаллы, используемые в реле, имеют специальную конструкцию со стеклянной изоляцией  $p-n$ -переходов, что обеспечивает высокие предельно допустимые напряжения анод-катод (не ниже 1200 В при токе утечки не более 100 мкА). Стеклянная изоляция обеспечивает также высокую стабильность этого параметра во времени при прямых и обратных смещениях в отличие от традиционных тиристорно-диодных модулей МТТ, МТД, МТОТО и т.д., где используется кремнийорганическая изоляция  $p-n$ -переходов.

На верхней поверхности керамики сформирован рисунок меди, который обеспечивает необходимые электрические соединения между кристаллами, элементами схемы управления и внешними контактными площадками. Соединение кристалла с медной металлизацией керамики производится алюминиевой проволокой методом ультразвуковой сварки. Диаметр используемых проволок в зависимости от номинального тока прибора – от 300 мкм до 500 мкм, а их число – от 2 до 14, при этом

одна проволока диаметром 0,3 мм способна выдерживать длительный ток до 20 А, а 0,5 мм – 55 А. Петля алюминиевой проволоки обеспечивает компенсацию тепловых расширений при циклическом изменении температуры реле. Эта особенность реле, как любого силового полупроводникового прибора, в первую очередь влияет на долговечность и надежность прибора.

Силовая сборка, выполненная на радиаторе прибора, является коммутирующим элементом реле. Схема управления этим коммутирующим элементом располагается на печатной плате, соединенной как с силовыми контактами реле, так и с управляющими контактами.

Силовые контакты реле имеют непосредственный электрический контакт с медной металлизацией керамической подложки, что обеспечивает минимальные потери, а также контакт с печатной платой. Силовые контакты выполняются из медных шин необходимого сечения, обеспечивающего протекание необходимого уровня тока. Управляющие контакты электрически соединены только с печатной платой. Ток, протекающий через них, небольшой, однако для унификации конструкции они выполняются подобно силовым контактам.

Сборка реле из радиатора и печатной платы закрыта корпусом из специального трудногорючего, с высокой диэлектрической прочностью и нулевой трекингостойкостью пластика, внутренний объем которого заполнен специальным эластичным кремнийорганическим компаундом, имеющим широкий диапазон температур эксплуатации (от –60 до +150 °С), что также обеспечивает эксплуатацию реле в режиме циклического изменения температуры.

Подключение внешних силовых кабелей или шин осуществляется с помощью винтов с резьбой М5, что при обеспечении стягивающего момента 3 Н·м создает необходимый электрический контакт между внешней клеммой или шиной и силовой клеммой реле.

Подключение управляющих контактов производится, в зависимости от тока реле, или через винтовое соединение с резьбой М3, или через быстроразъемный соединитель (fast-on) шириной 28 мм, к которому также можно просто подпаять провода. При резьбовом соединении контакт также должен быть надежным для предотвращения нарушения работоспособности реле.

Внешний вид реле показан на рис. 106.

## 5.4. Электронные аппараты высокого напряжения

### 5.4.1. Общие сведения об электронных аппаратах высокого напряжения

Электронные аппараты высокого напряжения по принципу действия и основным характеристикам не отличаются от электронных аппаратов низкого напряжения. Это обусловлено тем, что в тех и других аппаратах основными элементами, определяющими свойства аппарата, являются СПП. Однако практическая реализация аппаратов высокого напряжения связана с решением комплекса сложных задач, обусловленных прежде всего групповым (последовательным и параллельным) соединением большого числа полупроводниковых приборов.

На рис. 107 показан *силовой блок аппарата переменного тока* в однополюсном исполнении. В каждом направлении тока тиристоры соединены последовательно и параллельно в количестве, обеспечивающем расчетные параметры по напряжению и току проектируемого аппарата. С учетом ограниченной мощности единичных приборов общее их число в блоке может достигать нескольких десятков.

Очевидно, что главная цепь аппарата в этом случае будет содержать множество жестких контактных соединений, в связи с чем необходимо принимать специальные меры, позволяющие обеспечить низкие переходные сопротивления контактов и высокий уровень их надежности.

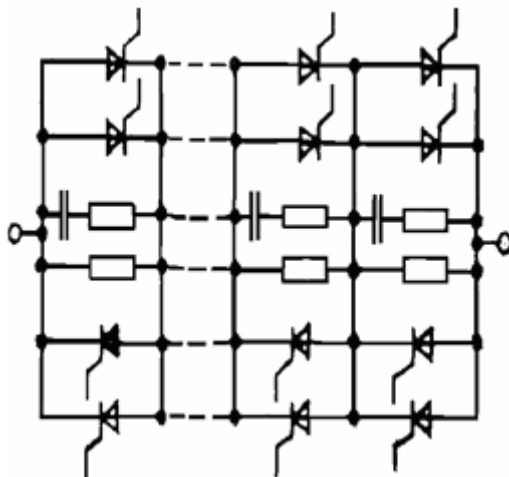


Рис. 107. Электрическая схема высоковольтного тиристорного блока с элементами защиты от перенапряжений

Другие задачи связаны непосредственно с характеристиками СПП, в частности с характеристиками тиристоров. Являясь быстродействующими ключевыми элементами, тиристоры не обладают идеальными для

применения в аппаратах свойствами: и в состоянии высокой проводимости, и в закрытом состоянии в них происходит выделение относительно большого количества теплоты. В среднем на каждые 100 А тока в прямом направлении потери мощности в тиристорах при полном угле проводимости ( $180^\circ$ ) составляют около 200 Вт. Существенными являются также потери, обусловленные протеканием токов утечки, если приборы работают при напряжениях, близких к предельно допустимым.

При большом числе тиристоров в силовом блоке рассеивание выделяемой мощности потерь может быть осуществлено только при использовании специальной системы охлаждения, создание которой требует сложных технических решений, увеличивает массу и габариты силового блока.

По сравнению с аппаратами низкого напряжения тиристорные аппараты высокого напряжения имеют более сложную систему управления. Это объясняется как увеличением числа СПП в силовых блоках, так и более жесткими требованиями к параметрам формируемых системой управления управляющих импульсов. При создании системы управления должны быть решены вопросы, связанные с распределением управляющих импульсов по тиристорам, синхронизацией их с кривой тока или напряжения, обеспечением надежной электрической изоляции между силовой цепью, находящейся под высоким напряжением, и управляющими цепями.

Проблемы возникают также из-за неидентичности характеристик диодов или тиристоров, соединяемых в группы. При последовательном соединении разброс характеристик СПП по быстродействию при включении и выключении, а также различия по токам утечек в непроводящем состоянии могут вызвать неравномерное распределение напряжения по приборам. Чтобы при таких условиях аппарат был способен выполнять надежно свои функции, необходимо либо увеличивать число последовательно соединенных приборов, либо устранить неравномерность распределения по ним напряжения.

Первый вариант, как правило, не практикуется из-за существенного увеличения затрат и затруднений технического характера.

Более целесообразным является второй вариант, хотя он также требует и усложнения конструкции блока, и определенных дополнительных затрат. В частности, широкое применение для уменьшения разброса напряжений по приборам находят RC-цепи, подсоединяемые параллельно к каждому тиристорному (рис. 107). В статических режимах работы аппарата (при частоте 50 Гц) напряжение достаточно равномерно распределяется при шунтировании приборов высокоомными резисторами.

Влияние неидентичности характеристик СПП сказывается также на распределении напряжения при последовательном их соединении – большая часть напряжения приходится на приборы с меньшими токами утечек. Причем не обязательно, что у одного и того же тиристора будет меньший ток утечки и в прямом, и в обратном направлении.

При изменении полярности прикладываемого напряжения, следовательно, может измениться и распределение напряжения по тиристорам.

Непредсказуемым также является изменение соотношения токов утечек с повышением температуры тиристоров. Кроме этого, можно констатировать, что во всем диапазоне изменения температуры и воздействующего напряжения обратные токи у тиристоров достигают значительно меньших значений, чем токи в прямом направлении, когда тиристоры находятся в закрытом состоянии. Максимальный разброс токов утечек, определяющий неравномерность распределения напряжения по тиристорам при последовательном их соединении, может составлять 500–800 % и более.

Для выравнивания напряжений применяются резисторы, включаемые параллельно каждому тиристоры. Ориентировочно значение сопротивления этих резисторов должно быть на порядок меньше, чем сопротивление СПП при повторяющемся напряжении.

#### **5.4.2. Гибридные электронные аппараты высокого напряжения**

Общность закономерностей протекания коммутационных процессов в комбинированных аппаратах низкого и высокого напряжения определяет возможность использования одних и тех же (или схожих) принципиальных схем силовой части аппарата.

В частности, все варианты исполнения силовой части комбинированных аппаратов низкого напряжения полностью приемлемы и для аппаратов высокого напряжения. Что касается конструктивного исполнения, то оно определяется в основном базовой конструкцией используемого контактного устройства и выбранным способом воздействия на электрическую дугу. По этим признакам комбинированные аппараты высокого и низкого напряжения существенно отличаются.

Наиболее общей для комбинированных выключателей высокого напряжения является схема (рис. 108), контактная система в которой представлена типичной для контактных аппаратов совокупностью главных контактов S1, дугогасительных контактов S2 (резистор  $R_{\Pi}$  во внимание не принимать) и контактов отделителя S3. Непосредственно к дугогасительным контактам (параллельно) подсоединен полупроводниковый блок (ПБ). Он может быть выполнен по схеме со встречно-

параллельно соединенными цепями тиристоров или в виде только одной тиристорной (диодной) цепи, если проектируется синхронизированный аппарат. Параллельно каждому СПП подключаются элементы, обеспечивающие выравнивание распределения восстанавливающегося напряжения по отдельным приборам и ограничение его амплитуды:  $R_{ш}$ , RC-цепи и варисторы.

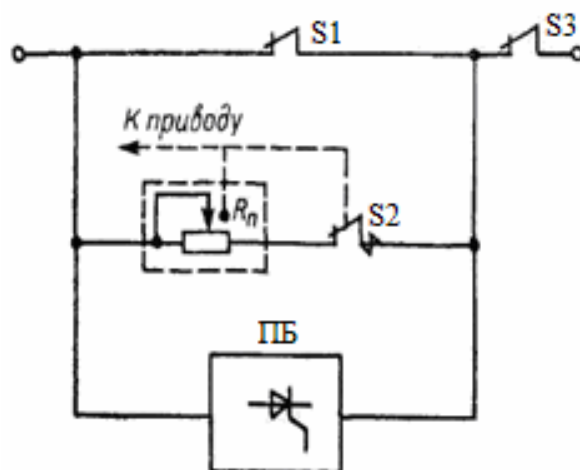


Рис. 108. Функциональная схема гибридного выключателя

Учитывая ограниченный диапазон напряжений (до 35 кВ), в котором применение комбинированных аппаратов эффективно, в качестве базового контактного аппарата можно использовать воздушный, мало-масляный, вакуумный и электромагнитный выключатель. Однако наилучшие результаты в отношении облегчения условий работы контактов достигаются при применении электромагнитных и воздушных аппаратов. Это объясняется тем, что в них обеспечивается быстрое увеличение напряжения на дуге до уровня, при котором возможно включение полупроводникового блока. Напротив, вакуумные дугогасительные устройства характеризуются малым напряжением на дуге, составляющем 20...40 В при токе до 10 кА, что затрудняет использование их в комбинированных аппаратах на напряжение свыше 10 кВ, к тому же достигнутые к настоящему времени характеристики вакуумных камер по коммутационному ресурсу и предельной коммутационной способности позволяют создавать высокоэффективные аппараты на их основе без специальных дополнительных устройств.

Во включенном положении аппарата все его контакты (S1, S2 и S3) замкнуты. Из-за относительно большого сопротивления контура с дугогасительными контактами S2 протекаемый в нем ток составляет



5...10 % от тока в главных контактах. Тиристоры в полупроводниковом блоке закрыты.

Отключение гибридного аппарата можно условно разделить на три стадии.

Первая стадия соответствует размыканию главных контактов S1, в результате чего осуществляется переход тока из главной цепи в дугогасительный контур. Продолжительность этой стадии определяется конструктивным исполнением контактной схемы и соотношением активных и реактивных сопротивлений параллельных контуров.

Вторая стадия коммутационного процесса начинается в момент времени, который соответствует размыканию дугогасительных контактов S2. Одновременно с этим моментом времени или с небольшим опережением его необходимо подавить управляющие импульсы напряжения на тиристоре полупроводникового блока. Образующуюся при размыкании контактов электрическую дугу можно рассматривать в двух аспектах. С одной стороны, – это нежелательное явление, приводящее к быстрому износу контактов и последующему их разрушению. С другой стороны, она представляет собой активное переменное сопротивление, которым можно управлять посредством различных воздействующих факторов. В обычных воздушных выключателях переменного тока дугогасительные устройства конструируются таким образом, чтобы обеспечивались условия, необходимые для поддержания достаточно высокой проводимости дуги в течение всего полупериода тока, а непосредственно у нуля тока (за единицы микросекунд) проводимость резко снижалась. В результате удается свести до минимума энергию, выделяемую в дуговом промежутке в течение полупериода, исключить возможность появления среза тока в конце полупериода и, в то же время, обеспечить успешное гашение дуги в околонулевой области. При конструировании дугогасительных устройств комбинированных аппаратов задача управления интенсивностью воздействия на электрическую дугу теряет смысл. В данном случае необходимо добиться быстрого нарастания падения напряжения на дуге сразу же после размыкания контактов S2.

Третья стадия отключения аппарата соответствует окончательному прерыванию тока полупроводниковым блоком. Как и у всех электронных аппаратов, этот процесс завершается при переходе тока через нуль.

Если аппарат предназначен для оперативного отключения номинальных токов и токов перегрузки, то к нему не предъявляются жесткие требования в отношении собственного времени отключения. Важным является лишь сокращение до минимума времени горения дуги. Это обстоятельство позволяет создавать гибридные аппараты с однонаправленными тиристорными или диодными цепями в полупроводниковых

блоках, т.е. синхронизированные аппараты. В результате становится возможной реализация тех преимуществ, которые присущи синхронизированным аппаратам.

## **5.5. Системы управления электронными аппаратами**

### **5.5.1. Требования к системам управления**

Главным требованием к источнику управляющих сигналов является обеспечение правильной работы тиристоров в силовых блоках аппаратов. Это требование можно сформулировать следующим образом: надежность тиристора обеспечивается, если выходные параметры источника управления соответствуют области токов и напряжений диаграммы его управления, называемой областью гарантированного включения.

Выбор конкретных значений токов и напряжений прибора и, следовательно, требования к выходным параметрам источника управления зависят от того, в каких режимах работы и в какой схеме предполагается использовать тиристор.

Например, неодинаковые требования предъявляются к управляющим сигналам, с помощью которых обеспечивается включение основного тиристора VS1 и коммутирующего VS2 в аппарате постоянного тока. Если нагрузка активно-индуктивная, а ток и напряжение коммутируемой цепи не являются предельными для тиристора VS1, включение его можно осуществлять сигналом небольшой мощности, т.е. с параметрами тока и напряжения, которые соответствуют длительному управлению. Никаких других требований, в том числе к скорости нарастания IGT, не предъявляется; для управления тиристором VS2, который работает в режиме многократной перегрузки по току и, как правило, при предельных значениях по скорости нарастания анодного тока, требования к управляющему току (напряжению) повышаются.

Во-первых, длительность его не должна превышать длительность коммутационного процесса, заканчивающегося перезарядкой конденсатора. Во-вторых, для повышения стойкости тиристора необходимо обеспечивать его включение импульсом тока с большой амплитудой и с крутым фронтом.

Еще более высокие требования к источникам управляющих сигналов предъявляются при групповом (параллельном, последовательном или смешанном) соединении тиристоров в силовых блоках. В этом случае возникают проблемы не только с формированием импульсов тока (напряжения) с определенными параметрами, но и с гальваническим разделением силовой и управляющей цепей, синхронизацией поступле-

ния сформированных импульсов с заданными моментами времени. В результате значительно усложняется и реализующая перечисленные функции схема, которую в дальнейшем будем называть системой управления (СУ).

К настоящему времени разработаны и находят применение весьма разнообразные по исполнению и принципу действия СУ, что объясняется широкой номенклатурой электронных аппаратов, а также большим числом различных приборов и устройств автоматики, на основе которых возможно построение системы управления.

Тем не менее все существующие *системы управления* тиристорами и тиристорными аппаратами можно разделить на *следующие виды*:

1. Электронные, выполненные на базе транзисторов, диодисторов, маломощных и мощных тиристоров, интегральных микросхем, микропроцессоров.

2. Электромагнитные, построенные на основе магнитных усилителей, пик-трансформаторов, насыщающихся дросселей, трансформаторов тока, трансформаторов напряжения и др.

3. Комбинированные, включающие в себя элементы первых двух групп в различных сочетаниях.

В зависимости от назначения аппарата и схемы силового тиристорного блока СУ может быть очень простой, как, например, в контакторе переменного тока низкого напряжения, или очень сложной, если она предназначена для управления тиристорным аппаратом переменного тока высокого напряжения. Различны и требования, которым СУ должны удовлетворять.

Однако уже из отмеченного выше следует, что *ряд требований* являются общими для всех СУ. Они должны обеспечивать:

- генерирование управляющих импульсов с оптимальными для заданного режима работы тиристоров амплитудой, длительностью и крутизной фронта;
- стабильность параметров формируемых импульсов во времени и при изменении температурных режимов;
- синхронизацию выдачи импульсов на управляющие электроды тиристоров с фазой тока нагрузки или с фазой напряжения питания;
- высокое быстродействие и готовность к работе.

Кроме того, СУ должны быть помехоустойчивы, иметь по возможности малые массу и габариты, потреблять небольшое количество энергии.

В большинстве практических случаев управление тиристорами осуществляется импульсными системами управления. Реализуемые при этом преимущества значительны, но одновременно появляются и слож-

ности в выборе оптимальных параметров импульсов тока, и прежде всего в выборе достаточной их длительности.

При большой индуктивности в коммутируемой цепи процесс нарастания тока сильно затягивается, и это требует поддержания управляющего сигнала в течение времени, значительно превышающего собственное время включения тиристора. При недостаточной длительности управляющего сигнала анодный ток тиристора не успевает достичь значения тока надежного включения и тиристор снова выключается. Особую опасность режим ненадежного включения представляет, если тиристоры в силовом блоке аппарата соединены параллельно или последовательно. В этом случае невключение одного или нескольких из параллельно соединенных приборов приводит к перегрузкам по току включившихся тиристоров. При последовательной работе тиристоры, не успевшие полностью включиться, подвергаются воздействию многократных перенапряжений.

Второй фактор, влияющий на выбор длительности управляющего импульса, также связан с индуктивностью нагрузки, которая определяет разность фаз напряжения и тока в установившемся режиме работы.

Если выдачу управляющих сигналов на входы тиристоров синхронизировать с переходом напряжения источника питания через нуль, то длительность управляющего импульса должна быть увеличена на величину, определяемую возможным углом сдвига фаз. Если учесть, что коммутирующие аппараты должны надежно работать при изменении угла в широких пределах ( $\cos\varphi \approx 0,2 \dots 0,9$ ), синхронизация по напряжению, по существу, приводит к использованию для управления тиристорами импульсов большой длительности. Поэтому при нестационарной активно-индуктивной нагрузке необходимо стремиться к осуществлению синхронизации управляющих импульсов с кривой тока в нагрузке.

### **5.5.2. Импульсное управление**

Устойчивое включенное состояние тиристорных аппаратов переменного тока обеспечивается за счет периодически поступающих на входы (управляющие электроды) тиристоров управляющих импульсов.

При встречно-параллельном соединении тиристоров в силовом блоке общее число формируемых СУ управляющих импульсов должно быть равно числу тиристоров в блоке, причем половина из них вырабатывается со сдвигом на угол  $\pi$  по отношению к другим.

Если аппарат предназначен только для выполнения функции коммутирования цепей, начала импульсов должны быть синхронизированы с моментами перехода тока нагрузки через нулевые значения, как пока-

зано на рис. 109, который иллюстрирует процесс работы одного модуля аппарата, содержащего два встречно-параллельно соединенных тиристора. Формирование управляющих импульсов можно синхронизировать с моментами перехода через нулевые значения напряжения.

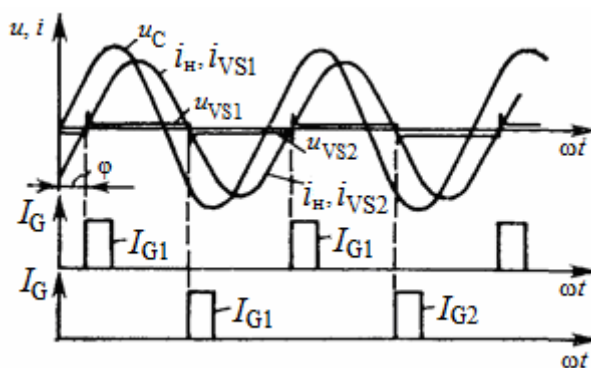


Рис. 109. Диаграмма работы тиристорного аппарата

Но в этом случае из-за увеличения длительности импульсов возникают трудности передачи их через разделительные трансформаторы и увеличивается мощность формирователей.

Если аппарат кроме коммутационных операций должен выполнять и функции регулирования проходной мощности (фазовое управление), СУ должна обеспечивать сдвиг (задержку) управляющих импульсов относительно нуля тока на заданный угол  $\alpha$ . Простые схемы, обеспечивающие регулирование  $\alpha$ , приемлемы, когда тиристоры работают индивидуально. В общем случае формирование, синхронизация и распределение управляющих импульсов по тиристорам осуществляются автономными от силовых цепей системами управления.

В зависимости от **принципа формирования** и распределения импульсы СУ подразделяются на одно- и многоканальные, а в зависимости от **принципа регулирования фазы** (угла задержки  $\alpha$ ) – на горизонтальные, вертикальные, цифровые.

При **горизонтальном управлении** формирование управляющих импульсов осуществляется в моменты перехода синусоидального напряжения через нулевые значения. Изменение фазы импульсов обеспечивается регулированием фазы напряжения и, следовательно, смещением нулевых значений напряжения по оси времени (по горизонтали). Для практической реализации этого метода в составе СУ должен быть генератор напряжения, который вырабатывает синусоидальное напряжение с той же частотой, что и напряжение, прикладываемое к тиристор, или ток, протекающий через него.

Наиболее простой является СУ, в которой в качестве генератора напряжения используется трансформатор тока или трансформатор напряжения, включенный соответственно последовательно или параллельно с тиристором, которым надо управлять.

На рис. 110 приведена структурная схема СУ, реализующая горизонтальный метод управления тиристором VS. Генератором синусоидального напряжения в ней является трансформатор напряжения TV.

Снимаемое со вторичной обмотки трансформатора напряжение, синхронизированное с напряжением на тиристоре, подается на фазосдвигающее устройство (ФУ), например на мостовой фазовращатель. С выхода ФУ напряжение  $U_{\text{ФУ}}$ , смещенное на угол относительно напряжения  $U_{\text{TV}}$ , поступает в устройство, фиксирующее переход напряжения через нулевые значения – нуль-орган (НО). Импульсами напряжения, появляющимися на выходе НО, запускается формирователь управляющих импульсов (ФИ). В результате на вход тиристора VS подается управляющий импульс напряжения  $U_G$ , задержанный относительно начала положительного полупериода анодного напряжения на угол  $\alpha = \varphi$ .

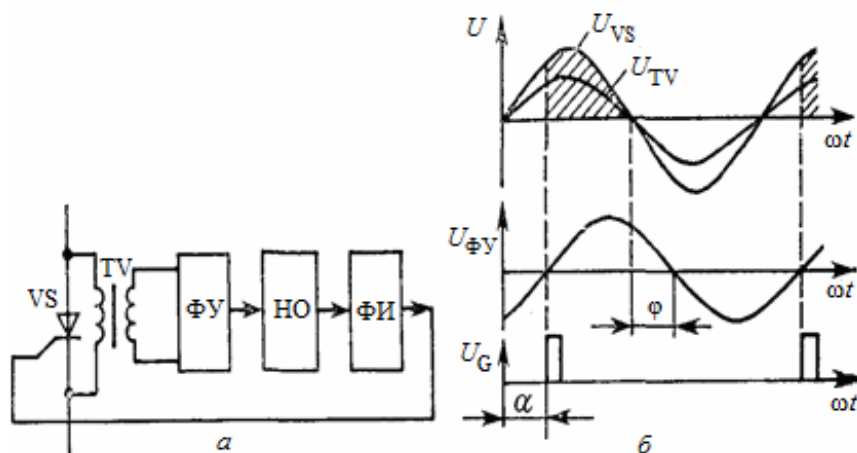


Рис. 110. Структурная схема системы управления (а) и диаграмма, поясняющая ее работу (б)

При **вертикальном методе управления** формирование управляющего импульса осуществляется в момент равенства по абсолютной величине двух напряжений, одно из которых постоянное, а другое переменное (синусоидальное, треугольное или пилообразное). Постоянное стабилизированное напряжение, называемое напряжением управления, должно быть регулируемым, а переменное напряжение должно быть синхронизировано с напряжением на тиристоре, для которого формируется управляющий импульс.

Один из возможных вариантов исполнения СУ с использованием вертикального метода управления силовым блоком с встречно-параллельным соединением тиристоров приведен на рис. 111.

Напряжение с тиристорного блока подается на СУ через сетевой фильтр (Ф), сглаживающий импульсные помехи в напряжении сети. С помощью пороговых элементов (ПЭ) синусоидальное напряжение преобразуется в прямоугольные импульсы с взаимным сдвигом по фазе на угол  $180^\circ$  и паузой  $\delta \approx 3...5^\circ$  между окончанием одного импульса и началом следующего, которая обусловлена порогом срабатывания ПЭ1 и ПЭ2.

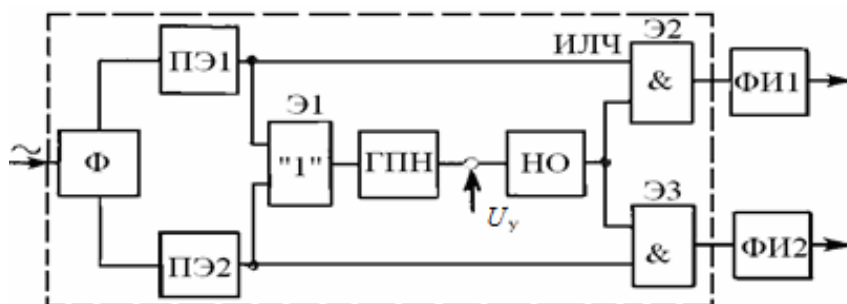


Рис. 111. Структурная схема одноканальной системы управления, реализующая принцип вертикального управления

В результате такого сдвига на входе логического элемента Э1 имеет место совпадение сигналов (логических нулей) в течение времени  $t = \delta/\omega$ . На выходе Э1, следовательно, формируются короткие импульсы, фиксирующие начало и конец каждого полупериода синусоидального напряжения. Эти импульсы используются для запуска генератора пилообразного напряжения (ГПН). На входе нуля-органа (НО) вырабатываемое ГПН напряжение сравнивается с напряжением управления  $U_y$ . С момента времени, когда эти напряжения становятся равными и их разность меняет знак, на выходе НО формируется прямоугольный импульс напряжения  $U_{НО}$  (рис. 112), который подается одновременно на входы логических элементов Э2 и Э3.

На другие входы этих элементов поступают импульсы напряжения с выходов пороговых элементов ПЭ1 и ПЭ2. Срабатывание логических элементов Э2 и Э3 происходит в момент времени, начиная с которого напряжение, соответствующее логической единице, подается на оба их входа.

Поскольку импульсы напряжения на выходах пороговых элементов ПЭ1 и ПЭ2 смещены во времени на величину длительности полупериода сетевого напряжения (10 мс при частоте  $f$  50 Гц), каждый из логиче-

ских элементов Э2 и Э3 срабатывает поочередно с частотой  $f$ . В результате обеспечивается и поочередный запуск формирователей управляющих импульсов ФИ1 и ФИ2. Задержка включения тиристоров на заданный угол  $\alpha$  осуществляется регулированием напряжения управления (по вертикали), что приводит к смещению импульса напряжения на выход нуля-органа  $U_{HO}$  (рис. 112) и, следовательно, на выходе логических элементов Э2 и Э3.

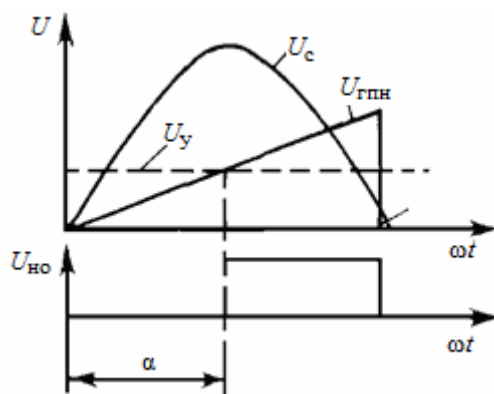


Рис. 112. К пояснению вертикального метода фазового управления

**По структуре исполнения** СУ разделяются на одноканальные и многоканальные.

В **одноканальных СУ** все операции, связанные с синхронизацией и смещением по фазе управляющих импульсов, формируемых для всех тиристорных ветвей многоканального аппарата, реализуются в одном общем канале. Этим обеспечивается высокая фазовая симметрия управляющих импульсов и уменьшение аппаратных затрат.

Однако для распределения импульсов по тиристорам необходимы дополнительные устройства (регистры сдвига, кольцевые пересчетные схемы), что приводит к усложнению системы управления и ограничению ее применения.

**Многоканальные системы управления** объединяют в себе идентичные по исполнению каналы, каждый из которых содержит генератор развертки, синхронизированный с сетью, фазосмещающее устройство, пороговое устройство и формирователь. Например, для создания систем управления трехполюсным аппаратом со встречно-параллельным соединением тиристоров требуются три идентичных канала, выполненные по схеме на рис. 111. Достоинством этих СУ является простота структурной схемы. Но они требуют подстройки каналов с целью их симметрирования.



В трехполюсных аппаратах, предназначенных для коммутирования и защиты электрических цепей, регулирования проходной мощности, СУ выполняют более сложные функции и имеют соответственно намного более сложную структурную схему, чем описанные выше. В частности, они могут содержать в себе дополнительно блок анализа сигналов, поступающих от датчика тока напряжения, блок анализа состояния тиристоров в полюсах, блок управления тиристорами узла принудительной коммутации и др. Очевидно, что в этом случае СУ, построенная на основе аналоговых интегральных микросхем общего назначения, становится очень сложной и надежность ее снижается. Одним из способов повышения надежности СУ является применение специальных микросхем, реализующих функции одного канала или даже нескольких каналов.

Перспективным направлением создания универсальных СУ является использование *цифровых интегральных микросхем*. Это предполагает переход от оперирования с аналоговыми сигналами (изменяющимися по закону непрерывной функции) к оперированию сигналами, изменяющимися по закону дискретной функции.

Основой цифровой СУ является микропроцессор (МП), представляющий собой программно-управляемое устройство, которое осуществляет процесс обработки цифровой информации и управление им. В зависимости от выполняемых СУ функций микропроцессор строится на одной или нескольких больших интегральных микросхемах (БИС), для которых характерна очень высокая степень интеграции. В одной БИС содержится несколько тысяч или даже десятки тысяч различных элементов.

Для осуществления связи микропроцессора с датчиками тока и напряжения, формирователями управляющих импульсов, исполнительными органами защиты необходимы устройства сопряжения (устройства ввода/вывода). В данном случае такими устройствами являются аналого-цифровые (АЦП) и цифро-аналоговые (ЦАП) преобразователи. С помощью АЦП аналоговые электрические сигналы преобразуются в цифровые данные (коды), которыми оперирует микропроцессор. Вырабатываемые им команды в цифровых кодах преобразуются в аналоговые сигналы с помощью ЦАП и после этого поступают на исполнительные элементы.

Совокупность микропроцессора, средств сопряжения и программного обеспечения называется микропроцессорной системой.

Программное обеспечение – это последовательность команд, которые хранятся в запоминающем устройстве и реализуют требуемую последовательность операций.

В упрощенном виде **структурная схема СУ на основе микропроцессора** приведена на рис. 113. Микропроцессор в ней представлен четырьмя блоками: регистром команд (РК), устройством управления (УУ), арифметически-логическим устройством (АЛУ) и запоминающим устройством (ЗУ).

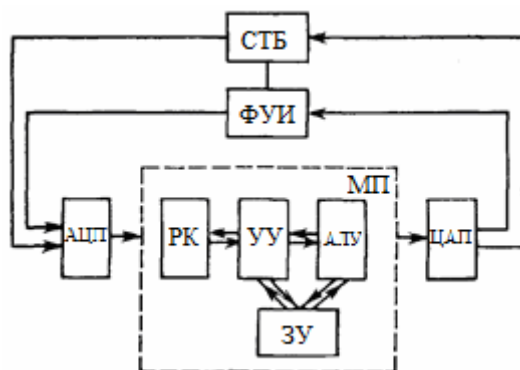


Рис. 113. Структурная схема микропроцессорной системы управления

Связь МП с силовым тиристорным блоком (СТБ) и формирователем управляющих импульсов (ФУИ) осуществляется через АЦП (ввод данных) и ЦАП (выдача команд).

### 5.5.3. Транзисторные и трансформаторные схемы управления в аппаратах низкого напряжения

В аппаратах низкого напряжения, предназначенных для выполнения простых функций (коммутирование цепей, фазовое регулирование), широкое распространение нашли схемы управления тиристорами, выполненные на основе транзисторов и трансформаторов с насыщающимися магнитопроводами. Характерным для этих схем являются простота конструкции, высокая надежность и низкая стоимость.

Транзистор как управляемый элемент может быть использован в качестве формирователя импульсов, усилителя, фазового инвертора, логического элемента, порогового элемента при преобразовании выходных сигналов различных датчиков. Малая входная мощность, необходимая для схем управления на транзисторах, подается обычно с индикаторных цепей или с других цепей с большим выходным сопротивлением.

Широкими возможностями обладают транзисторные схемы в отношении формирования выходных сигналов с заданными параметрами импульсов. Схемы, реализующие одни и те же функции, могут быть выполнены на транзисторах различного типа и вида: *p-n-p*-типа, *n-p-n*-

типа, однопереходных транзисторах, полевых оптронных транзисторах и др. Поэтому существует большое число разнообразных вариантов схем управления и отдельных их узлов, синхронизирующих устройств.

Тем не менее большинство из них можно отнести к уже известным типовым схемам, таким, как мультивибратор с одним или двумя устойчивыми состояниями, блокинг-генератор, триггер Шмитта и др.

Мультивибратор с одним устойчивым состоянием применяется для формирования прямоугольных импульсов с заданной длительностью (рис. 114). Длительность импульса определяется выбором постоянной времени перезарядки конденсатора  $C$ . Для запуска схемы можно использовать короткие синхронизирующие импульсы. Схема сама возвращается к исходному состоянию.

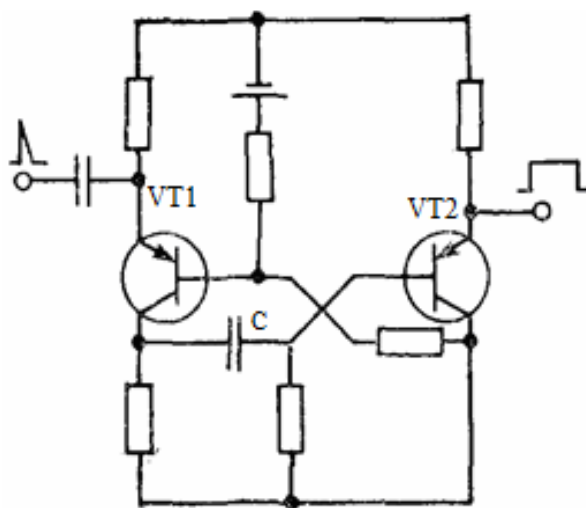


Рис. 114. Схема транзисторного формирователя прямоугольных управляющих импульсов

Если сделать симметричные перекрестные связи между базой и коллектором транзисторов  $VT1$  и  $VT2$ , то мультивибратор будет иметь два устойчивых состояния: включенный транзистор  $VT1$  и выключенный  $VT2$  или выключенный  $VT1$  и включенный  $VT2$ . Входные сигналы чередующейся полярности при этом необходимо подавать на базовый вывод транзистора  $VT1$  или  $VT2$ .

Мультивибраторы с двумя устойчивыми состояниями способны включаться каскадно, как это происходит в кольцевых счетчиках. При таком режиме работы обеспечивается возможность сдвига выходных импульсов на заданную величину для управления тиристорами в многополюсном исполнении.

Аналогичные функции могут выполнять транзисторные схемы блокинг-генератора и триггера Шмитта. Поскольку триггер Шмитта генерирует импульсы с очень малым временем нарастания, он может использоваться в качестве выходного формирователя управляющих импульсов, при жестких требованиях к крутизне их фронта, например при управлении параллельно соединенными тиристорами.

На рис. 115 приведена простая схема управления аппаратом переменного тока, выполненным на базе симистора VS. Источником напряжения управления в схеме является двусторонний стабилитрон VD. Транзистор VT включен в диагональ выпрямительного моста, что позволяет обеспечивать протекание тока управления через него при изменении полярности напряжения на симисторе. Включение и отключение схемы осуществляются соответственно подачей напряжения смещения на базу транзистора и его снятием.

Применение трансформаторов дросселей с насыщающимися магнитопроводами в системах управления аппаратами переменного тока обусловлено способностью этих магнитопроводов резко изменять индуктивное сопротивление обмоток. В зависимости от цели применения магнитопровод трансформатора может быть выполнен из материала с прямоугольной петлей гистерезиса или из магнитомягких материалов, у которых коэрцитивная сила составляет десятые доли ампера на сантиметр.

В схеме, показанной на рис. 116, трансформатор Т с магнитопроводом из материала с прямоугольной петлей гистерезиса включен в управляющую цепь последовательно с диодом VD1 и резисторами R1 и R2. Если магнитопровод трансформатора насыщен, индуктивное сопротивление его вторичной обмотки мало и им можно пренебречь.

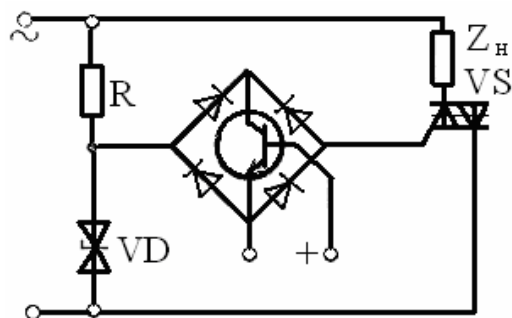


Рис. 115. Схема управления симметричным тиристором

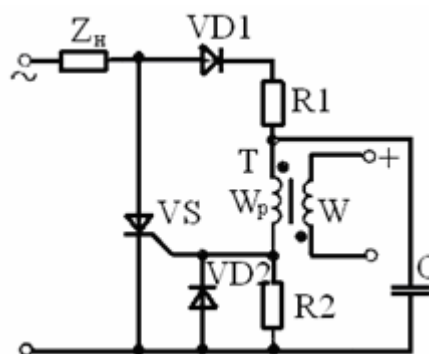


Рис. 116. Схема управления на основе трансформатора с насыщающимся магнитопроводом

Поэтому в положительный полупериод напряжения (когда диод VD1 смещен в прямом направлении) прикладываемое к тиристор и соответственно к управляющей цепи напряжение распределяется между резисторами R1 и R2. При  $R1 \gg R2$  большая часть напряжения падает на резистор R1. Напряжение на резисторе R2 в этом состоянии недостаточно для того, чтобы включить тиристор VS. Если в отрицательный полупериод приложить сигнал (+) к управляющей обмотке трансформатора, как это показано на рис. 116, то магнитопровод будет выведен из состояния насыщения.

В начале следующего положительного полупериода в течение времени, пока магнитопровод вновь намагничивается до состояния насыщения, индуктивное сопротивление обмотки остается большим и на нем поддерживается напряжение, в несколько раз большее, чем при насыщенном магнитопроводе. Конденсатор С при этом заряжается. По достижении в магнитопроводе трансформатора насыщенного состояния сопротивление обмотки резко уменьшается и конденсатор С начинает разряжаться на резистор R2 и входную цепь тиристора VS, обеспечивая его включение.

Таким образом, трансформатор, по существу, играет роль бесконтактного коммутатора цепи управления тиристора VS. Для периодического включения тиристора VS необходимо в интервале каждого отрицательного полупериода выводить магнитопровод трансформатора Т из насыщения с помощью управляющего импульса напряжения, подаваемого, например, от синхронизирующего устройства.

Выбор параметров трансформатора и соотношения сопротивлений резисторов R1 и R2 производится, исходя из того, что необходимое падение напряжения на управляющем электроде должно обеспечиваться в самом начале полупериода приложенного к тиристор VS напряжения.

Трансформаторы с насыщающимися магнитопроводами используются также в качестве синхронизирующих устройств в системах управления тиристорными аппаратами. Принцип реализации такого способа синхронизации поясняется функциональной схемой системы управления тиристорным блоком, которая приведена на рис. 117.

Трансформаторы Т1 и Т2 в ней включены последовательно с тиристорами в каждом из плеч силового блока. Это значит, что в первичных обмотках трансформаторов протекает выпрямленный пульсирующий ток. Если магнитопровод трансформатора изготовлен из магнитомягкого материала, характеристика которого имеет резко выраженную зону насыщения, то при синусоидальном токе в первичной обмотке магнитный поток меняется по трапецеидальной форме и во вторичной обмотке наводится ЭДС пикообразной (треугольной) формы. При однополупе-

риодном выпрямлении тока, что имеет место в каждом плече тиристорного блока, разнополярные импульсные ЭДС возникают в начале полупериода тока и в конце его.

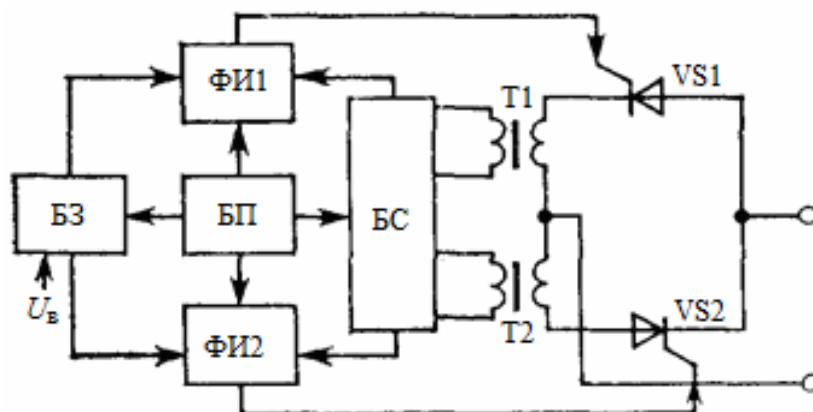


Рис. 117. Схема синхронизации на основе пик-трансформаторов

Первый положительный (условно) импульс является результатом резкого намагничивания магнитопровода до насыщения. Второй импульс соответствует выходу магнитопровода из режима насыщения в конце полупериода тока. Он фиксирует окончание проводимости тиристора в ветви и может быть использован для запуска формирователя управляющих импульсов (ФИ), с помощью которого осуществляется включение тиристора во встречно-параллельной ветви. В блоке синхронизации (БС) импульс треугольной формы преобразуется в прямоугольный или экспоненциальный, крутой фронт которого соответствует моменту перехода тока в нагрузку через нулевое значение.

Первоначальное включение силового блока осуществляется блоком запуска (БЗ) при воздействии на него импульсом напряжения  $U_B$  внешнего источника. Буквами БП обозначен блок питания.

Рассмотренный способ синхронизации управления тиристорным блоком по току отличается простотой и может использоваться в аппаратах низкого и высокого напряжения.

#### 5.5.4. Системы управления электронных аппаратов высокого напряжения

В аппаратах высокого напряжения катоды последовательно соединенных тиристоров находятся во время работы при разных напряжениях, поэтому цепь управления каждого прибора должна быть электрически изолирована от других. Практически это осуществляется использо-

ванием в цепях управления емкостной или индуктивной связи, а также применением методов управления, базирующихся на передаче энергии электромагнитными излучениями.

С последовательным соединением СПП связано еще одно требование к системе управления: она должна обеспечивать одновременное поступление управляющих сигналов на тиристоры с одинаковыми параметрами. Для удовлетворения этому требованию необходимо обеспечить равенство активных и реактивных сопротивлений в цепях, соединяющих управляющие электроды тиристоров выходными каскадами СУ, т.е. формирователями СУ. Сложность практического осуществления равенства полных сопротивлений состоит в том, что тиристоры по конструктивным соображениям находятся на разных расстояниях от формирователей.

При этом распределенные емкости, индуктивности и активные сопротивления подводящих проводов тоже могут существенно отличаться, что и вызывает изменение параметров управляющих сигналов или относительное смещение последних во времени. Очевидно, что в худшем положении в отношении искажения формы управляющего сигнала находится тиристор, наиболее удаленный от формирователя.

В зависимости от степени удовлетворения требованию одновременности поступления управляющих сигналов на управляющие электроды тиристоров различают одновременное и неодновременное управление.

**Неодновременное управление** имеет место в СУ, которые реализуют зависимое (вынужденное) включение последовательно соединенных тиристоров.

Принцип зависимого управления состоит в том, что управляющий сигнал поступает на вход только одного тиристора. Все остальные тиристоры включаются при помощи емкостной связи последовательно, один за другим. В приведенной на рис. 118 схеме вынужденного включения тиристора VS2 реализуется при каждом включении тиристора VS1 управляющим импульсом, поступающим от СУ.

Когда тиристоры VS1 и VS2 находятся в выключенном состоянии, прямое напряжение делится между ними поровну с помощью шунтирующих резисторов  $R_{ш}$  и демпфирующих цепей RC. Конденсаторы, следовательно, тоже заряжены до напряжения сети. При поступлении управляющего импульса на вход тиристора VS1 последний включается.

Напряжение на аноде тиристора VS1 начинает быстро уменьшаться. Одновременно с включением тиристора VS1 наступает перераспределение напряжения между тиристорами VS1 и VS2: конденсатор C1 разряжается, а C2 – заряжается. Ток разрядки конденсатора C1 протека-

ет по цепи:  $R_y$  – входная цепь тиристора VS2-VS1-R1. Таким образом осуществляется включение тиристора VS2 непосредственно после включения тиристора VS1.

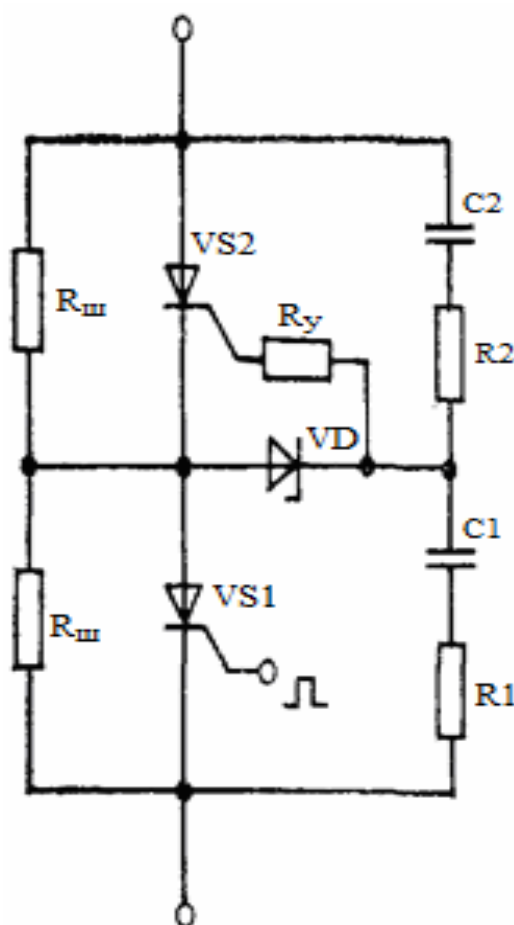


Рис. 118. Зависимое управление последовательно соединенными тиристорами

Так как тиристоры и RC-цепи представляют собой сбалансированный мост, схема нечувствительна к колебаниям напряжения в сети, что исключает возможность самопроизвольного включения тиристора VS2. Стабилитрон VD предохраняет управляющую цепь тиристора VS1 от превышения допустимого прямого напряжения.

Включение «ведомого» тиристора VS2 вызывается не только воздействием тока управления. При включении тиристора VS1 воспринимаемое им напряжение быстро перераспределяется между нагрузкой и тиристором VS2. Так как сопротивление нагрузки на несколько порядков меньше сопротивления тиристора в непроводящем состоянии, напряжение практически полностью прикладывается к тиристорам VS2, что способствует ускорению его переключения. Такой режим переключения допускают не все тиристоры. Поэтому методы зависимого управ-



ления, позволяющие очень просто решить проблему изоляции управляющих цепей, имеют ограниченное применение. Обычно их использование рекомендуется при числе последовательно соединенных тириستоров в силовом блоке менее пяти.

Системы управления, обеспечивающие одновременное включение последовательно соединенных тиристоров, имеют ту же структурную схему, которая приведена на рис. 111. Поэтому ниже рассмотрим только исполнение выходных каскадов СУ, к которым в данном случае предъявляются весьма высокие требования. По принципу обеспечения необходимой электрической изоляции между информационно логической частью (ИЛЧ) и формирователями импульсов (ФИ) или между ФИ и управляющими цепями тиристоров системы управления подразделяют на световые, радиоимпульсные и трансформаторные.

В световых СУ первичные управляющие импульсы задающего генератора преобразуются в световые импульсы, которые по световодам или через систему линз передаются на силовой блок, находящийся под высоким напряжением. В приемном устройстве происходит обратное преобразование световых импульсов в электрические с заданными параметрами и распределение их по тиристорам. Конструкции каналов передачи световых сигналов и преобразователей не имеют принципиальных различий с используемыми в световых системах управления контактными аппаратами высокого напряжения. Однако в полупроводниковых аппаратах требуются более мощные источники питания для выходных каскадов ФИ.

Это обусловлено тем, что управляющие импульсы должны вырабатываться постоянно (с частотой 100 Гц) в течение времени, пока аппарат находится во включенном состоянии. Мощность импульса длительностью 100 мкс, необходимая для включения одного тиристора, равна 150–250 Вт. Это значит, что энергия, потребляемая ФИ для удержания во включенном состоянии блока, например с 20-ю тиристорами в каждой из встречно-параллельно соединенных ветвей, за период может достигать 1 Дж. Это является сдерживающим фактором широкого применения ФИ со световым управлением, так как передача такой энергии со стороны потенциала земли или отбор ее от управляемой сети приводят к значительному усложнению конструкции аппарата, снижению его надежности.

Более простыми получают ФИ при управлении силовыми блоками на основе фототириستоров (рис. 119, а). В этом случае отпадает необходимость в преобразователях, источниках питания, расположенных на объекте, находящемся под высоким потенциалом, и устройствах передачи энергии к ним. Один полупроводниковый лазерный диод на

основе арсенида Галлия способен излучать энергию, достаточную для включения сотни фототиристоров. В качестве каналов передачи сигналов могут использоваться полые изоляционные или стекловолоконные световоды. Важно, что при этом обеспечивается полная электрическая развязка между СУ и силовой цепью без применения изолирующих трансформаторов, которые ухудшают распределение крутонарастающих напряжений по последовательно соединенным тиристорам.

Следует отметить, однако, что параметры по току и напряжению современных фототиристоров значительно ниже, чем у тиристоров обычного исполнения. Поэтому их использование в качестве коммутационных элементов главной цепи аппарата ограничено. Чаще на основе фототиристоров создают приемные устройства световых сигналов, где одновременно формируются мощные электрические сигналы для управления триодными тиристорами, или их используют в том случае, когда СУ имеет световую вставку между ИЛЧ и выходным каскадом ФИ (рис. 119, б). Подобным образом может быть осуществлено управление ФИ с применением радиоимпульсов. Но по сравнению со световыми системами передачи информации радиоимпульсные системы очень чувствительны к помехам и поэтому обладают меньшей надежностью.

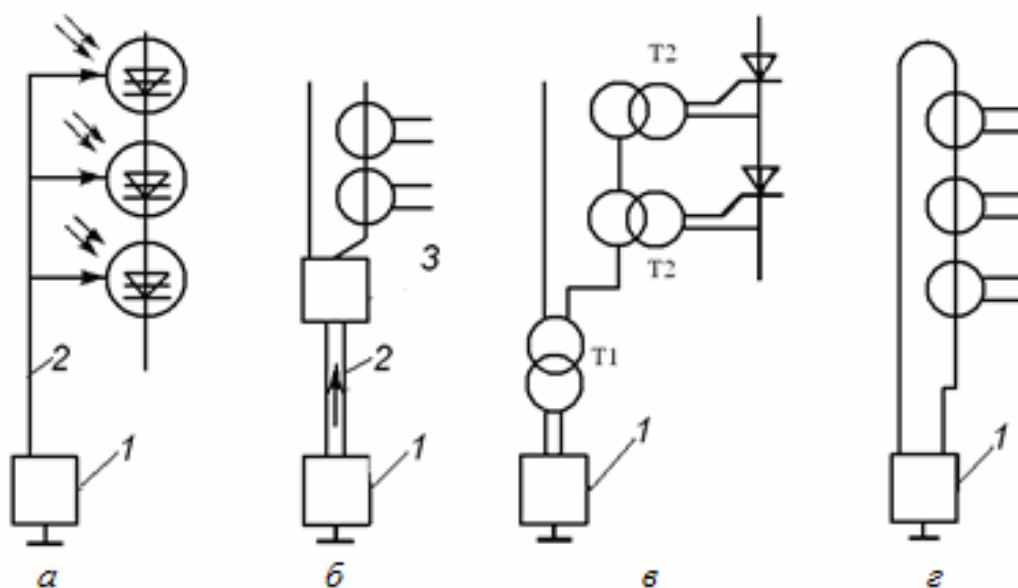


Рис. 119. Системы управления тиристорными блоками аппаратов высокого напряжения: 1 – информационно-логическая часть и выходной каскад формирователя; 2 – световой канал; 3 – преобразователь световых сигналов в электрические

В аппаратах с относительно низкими номинальными напряжениями (вплоть до 110 кВ) надежная изоляция и распределение управляю-

щих импульсов осуществляются с помощью трансформаторных ФИ. К настоящему времени разработаны различные варианты трансформаторных ФИ: на основе одного многообмоточного импульсного трансформатора; с последовательным и параллельным соединением импульсных трансформаторов; на основе различных комбинаций включения изолирующих и импульсных трансформаторов. Выбор того или иного ФИ определяется в основном требованиями к параметрам управляющих импульсов, уровню изоляции и помехоустойчивости. Например, каскадное соединение трансформаторов обеспечивает высокий уровень помехоустойчивости, так как элементы связи, имеющие собственную емкость, включаются последовательно, а напряжение на каждом трансформаторе снижается в  $N$  раз ( $N$  – число трансформаторов). В то же время, при  $N > 4...5$  сложно обеспечить крутой фронт импульсов и одновременность их формирования на всех трансформаторах, так как элементы трансформаторов, обладающие индуктивностью рассеяния, оказываются включенными последовательно.

На рис. 119, в показан ФИ, в котором передача управляющих импульсов от генератора к тиристорам осуществляется схемой с комбинированным соединением группового Т1 и индивидуальных Т2 трансформаторов. Преимущество этого варианта ФИ перед каскадным соединением трансформаторов состоит в том, что за счет использования в нем маломощных индивидуальных трансформаторов удастся существенно уменьшить неодновременность формирования управляющих импульсов и искажения их формы (фронта и амплитуды).

Как результат дальнейшего совершенствования трансформаторных схем можно считать ФИ, показанный на рис. 119, г. В нем генератор импульсов нагружен непосредственно на последовательно соединенные трансформаторы, у которых общей первичной обмоткой является кабель высокого напряжения. ФИ, построенные на этом принципе, называют кабельно-трансформаторными. По возможности удовлетворения требованиям к управляющим импульсам они сравнимы со световыми формирователями.

В то же время, кабельно-трансформаторные ФИ содержат значительно меньше элементов, более устойчивы к воздействиям внешней среды и обладают высокой надежностью.

Один из вариантов исполнения формирователя с тиристорным задающим генератором импульсов приведен на рис. 120.

Основой его является симметричный триггер с емкостной искусственной коммутацией тиристоров, нагруженный на изолирующие трансформаторы  $T1...T_n$  со встречно включенными первичными обмотками. В исходном состоянии схемы оба тиристора ( $VS1$  и  $VS2$ ) закрыты, кон-

денсатор  $C_k$  не заряжен, а конденсатор  $C$  заряжен до напряжения источника питания. При поступлении на один из тиристоров, например  $VS1$ , управляющего сигнала от ИЛЧ триггер срабатывает. При этом конденсатор  $C$  начинает заряжаться через ограничивающий резистор  $R$  на включенные в цепь тиристора  $VS1$  первичные обмотки трансформаторов и одновременно заряжается коммутирующий конденсатор  $C_k$  с указанной на рис. 120 полярностью.

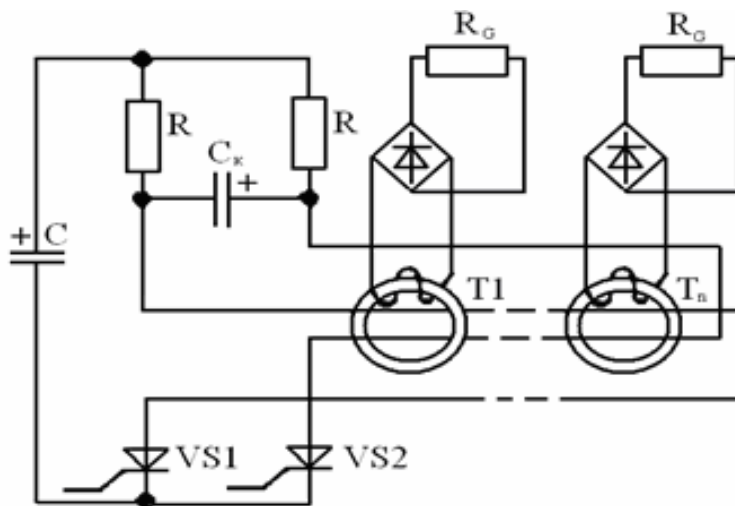


Рис. 120. Выходной каскад системы управления

По истечении времени, достаточного для установления напряжения на конденсаторе  $C_k$  выдается сигнал на включение тиристора  $VS2$ . В результате тиристор  $VS1$  оказывается под обратным напряжением и запирается, а ток разрядки конденсаторов  $C$  и  $C_k$  протекает по первичным обмоткам трансформаторов, включенных в анодную цепь тиристора  $VS2$ . Таким образом, осуществляется поочередное включение тиристоров  $VS1$  и  $VS2$  и, следовательно, изменение направления тока в первичной цепи трансформаторов.

Если в процессе работы триггера конденсатор  $C$  не подзаряжается (отключен от источника питания), то амплитуда импульсов напряжения на выходе формирователя уменьшается. Параметры генерируемой пачки импульсов можно менять посредством изменения емкости конденсаторов  $C$  и  $C_k$  сопротивления резисторов  $R$  или напряжения зарядки конденсатора  $C$ .

Включение тиристоров в гибридных аппаратах происходит при специфических условиях, которые обуславливают дополнительные требования к СУ. Главная особенность – это малое анодное напряжение на тиристорах при отключении аппарата. В зависимости от типа дугогаси-

тельного устройства общее напряжение на силовом полупроводниковом блоке может быть равным 50–100 В. Следовательно, при большом числе последовательно соединенных СПП напряжение на каждом из них может составлять единицы вольт.

Для включения тиристора при таком вводном напряжении требуются управляющие сигналы с предельно допустимой импульсной мощностью (130–250 Вт). Заметим, что в данном случае не ставится задача обеспечить одновременное включение тириستоров. Более того, неодновременное их включение позитивно влияет на общий процесс переключения всей цепи тиристоров. Это объясняется тем, что при включении одного или нескольких тиристоров увеличивается напряжение на остальных приборах, повышая тем самым их чувствительность к управляющему току.

Специфической особенностью СУ комбинированных аппаратов является также режим синхронизации их работы. В большинстве предлагаемых вариантов запуск СУ синхронизируется не с характерными точками кривой тока или напряжения, а с моментом размыкания контактов. Точно зафиксировать этот момент можно, например, с помощью элементов, реагирующих на появление электрической дуги (фоторезистор, фотодиод).

Но и в этом случае нельзя уверенно прогнозировать время, в течение которого напряжение на силовом блоке достигнет значения, необходимого для включения тиристоров. Оно определяется многими факторами, поэтому существует необходимость в формировании управляющих импульсов с длительностью, рассчитанной на самый неблагоприятный режим нарастания напряжения на силовом блоке. Результаты исследований различных режимов работы комбинированных аппаратов свидетельствуют о том, что максимальная длительность формируемых управляющих импульсов может быть равна 1,3...1,5 мс. Поскольку начало управляющего импульса при такой синхронизации заведомо упреждает возможный момент включения тиристоров, отпадает необходимость в формировании сигнала специальной формы. Важным является обеспечить ввод и поддержание на достаточном уровне заряда в базовых областях структуры тиристора в течение всего указанного времени. Очевидно, что и мощность управляющего импульса в этом случае должна соответствовать выбранной длительности.

В гибридных аппаратах с предвключаемым резистором достижение необходимого напряжения на силовом блоке фокусируется точно с помощью датчика напряжения и порогового элемента в ИЛЧ – системы управления, поэтому длительность управляющего импульса может быть сокращена до минимального значения (100–150 мкс), а импульсная

мощность соответственно повышена до предельного значения для данного типа тиристора.

Для СУ гибридных аппаратов характерен кратковременный (ждущий) режим работы. Это позволяет использовать источники питания малой мощности с небольшими габаритами и массой. Одновременно ждущий режим работы требует повышения надежности системы. Для исключения отказов СУ в ней должны быть предусмотрены функции самоконтроля. Практически это осуществляется периодическим запуском СУ и контролем параметров выходных импульсов.

Конструктивное исполнение кабельно-трансформаторной части формирователя зависит от требований к изоляции. В аппаратах на номинальное напряжение до 35 кВ в качестве первичных обмоток могут быть использованы различные кабели с резиновой и пластмассовой изоляцией (кабели управления, кабели для радиоустановок, высоковольтные рентгеновские кабели) или установочные провода. При необходимости усиления изоляции кабели и провода дополнительно заливаются эпоксидными компаундами или помещаются во фторопластовые трубы.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

### Физические постоянные проводниковых материалов

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельное сопротивление при 0 °С, 10 <sup>-8</sup> Ом·м	Температурный коэффициент сопротивления, 10 <sup>-3</sup> К <sup>-1</sup>	Теплопроводность при 0 °С, Вт/(м·К)	Температурный коэффициент теплопроводности <sup>-1</sup>	Теплоемкость, Дж/кг·К	Температурный коэффициент теплоемкости, 10 <sup>-4</sup> К <sup>-1</sup>	Температура плавления, °С	Температура испарения, °С	Модуль упругости, 10 <sup>10</sup> Н/м <sup>2</sup>
Алюминий твердотянутый	2700	2,62	4,2	210	4,5	950	4,7	660	1800	7,06
Бронза оловянистая твердотянутая	8700	14...16	0,6...0,7	64	17...20	360	—	900...950	—	10,8...11,8
Бронза бериллиевая литая	8220	7,2...9	—	84,0	—	140	—	—	—	—
Бронза бериллиевая твердотянутая	—	5,3	—	170	—	—	—	—	—	10,3
Вольфрам	19300	5,1	4,2	170	3	140	0,3	3410	5900	34,3
Гранит	1700...1800	700...1400	-1,3	160	-5...-10	650...850	35	—	3650	0,3...0,9
Дюралюмин	2750	3,3	2,2	160	—	930	—	650	—	7,0
Железо	7900	9...10	6,5	79,5	-3,9	640	0,5	1530	2450	19,6...21,6
Кадмий	8640	7,0	4,3	92	-1,2	230	—	321	770	4,9...6,7

Окончание табл. П.1

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельное сопротивление при 0 °С, 10 <sup>-8</sup> Ом·м	Температурный коэффициент сопротивления, 10 <sup>-3</sup> К <sup>-1</sup>	Теплопроводность при 0 °С, Вт/(м·К)	Температурный коэффициент теплопроводности <sup>-1</sup>	Теплоемкость, Дж/кг·К	Температурный коэффициент теплоемкости, 10 <sup>-4</sup> К <sup>-1</sup>	Температура плавления, °С	Температура испарения, °С	Модуль упругости, 10 <sup>10</sup> Н/м <sup>2</sup>
Константан (400...700)	8700...8900	45...52	0,003...0,005	—	—	—	—	1270	—	—
Латунь Л68 твердотяннутая	8500	7,0	1,5	100	—	380	1,1	900	—	10,8
Латунь Л62 твердотяннутая	—	7,2	—	—	—	—	—	900	—	9,8
Латунь Л59 отожженная	8900	7,2	—	—	—	—	—	900	—	19,9...9,8
Манганин (250...300)	8100...8400	42...50	0,03...0,06	—	—	—	—	960	—	—
Медь твердотяннутая	8700...8900	1,62	4,3	390	—	390	1,0	1083	2600	10,8...8,12
Молибден	10200	4,5...5,0	4,3	146	—3,0	272	—	2620	3560	34,3
Никель	8800	7,2	6,1	70	—0,5	460	4,3	1455	2730	20,6
Нихром (Х20Н80) (1000...1100)	8200	10...112	0,14	—	—	—	—	1390	—	—
Олово	7300	11,0	4,5	64	—4,7	230	1,3	232	2270	3,9...5,9
Свинец	11300	19,5	4,1	35	—5	130	0,9	327,4	1540	1,57
Серебро твердотяннутое	10500	1,5	4,0	420	—0,5	234	0,77	960	1955	7,4
Сталь	7800	10...13	9,0	40	—4	470	7,3	1300...1400	—	20,6...21,6



Таблица П.2

Допустимые превышения температуры  
для многослойных катушек  
(температура окружающего воздуха составляет 40 °С)

Класс нагрево- стойкости	Аппараты распределения энергии. Продолжительный режим работы		Аппараты управления приём- никами энергии. Прерывисто- продолжительный, повторно- кратковременный и кратковре- менный режимы работы	
	в воздухе	в трансфор- маторном масле	в воздухе	в трансфор- маторном масле
А	65	60	80	60
Е	80	60	90	60
В	90	60	100	60
F	110	---	120	---
Н	130	---	140	---

*Примечания:*

1. Измерение температуры катушек производится по изменению их сопротивления.
2. В случае применения в аппаратах трансформаторного масла превышение температуры масла в верхнем слое допускается: в аппаратах распределения энергии – до 40 °С, в аппаратах управления приёмниками энергии – до 60 °С.

Таблица П.3

Допустимые превышения температуры, °С,  
для электрических контактов в аппаратах низкого напряжения  
(температура окружающего воздуха составляет 40 °С)

Наименование	Аппараты распределения энергии. Продолжительный режим работы		Аппараты управления приемниками энергии. Продолжительный, прерывисто-продолжительный и кратковременный режимы работы	
	в воздухе	в трансформаторном масле	в воздухе	в трансформаторном масле
Контакты, коммутирующие цепи: а) из меди;	55	40	65 (примечания 1, 2)	65 (примечание 1)
б) гальванически покрытые серебром;	примечание 3	50	примечание 3	65
в) с накладками из серебра и металло-керамических композиций на базе серебра с окисью кадмия или меди по ГОСТ 388-67;	примечание 4	50	примечание 4	65
г) с накладками из других материалов;	примечание 5	50	примечание 5	65
д) массивные скользящие с накладками из серебра	80	50	80	65
Блок-контакты с накладками из серебра	80	50	80 (примечание 5)	65
Контактные соединения внутри аппаратов и неразъемные винтовые, болтовые, заклёпочные и другие жесткие (кроме паяных и сварных):				
а) из меди и её сплавов, из алюминия и его сплавов, без защитных покрытий контактных поверхностей;	55	50	55	55
б) из меди и её сплавов, из алюминия и его сплавов и из низкоуглеродистой стали, защищенные от коррозии покрытием контактных поверхностей соответствующим металлом, обеспечивающим стабильность переходного сопротивления лучше меди	65	50	65	65

*Примечания:* 1. При продолжительном режиме превышение температуры должно быть не более 55 °С.

2. Указанное превышение температуры при повторно-кратковременных режимах работы не должно быть больше, чем при испытаниях в условиях, когда на контактах возникает электрическая дуга.

3. Температура ограничивается теплостойкостью соседних частей, если слой серебра не повреждается электрической дугой и не стирается при испытаниях на механическую износостойчивость при нагретых контактах.

4. Температура ограничивается теплостойкостью соседних частей, но не должна превышать 200 °С.

5. Температура устанавливается в соответствии со свойствами материала.

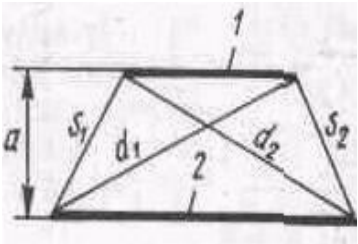
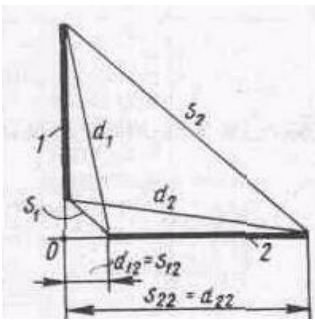
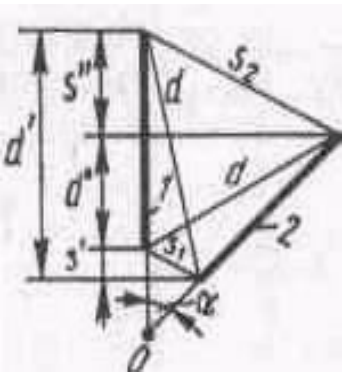
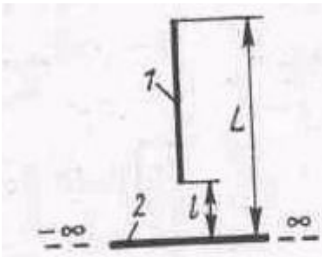
Таблица П.4

## Основные свойства листовой электротехнической стали

Марка стали	Толщина листа	Магнитная индукция В, Тл, при напряженности магнитного поля, А/см						Полные удельные потери, Вт/кг, при 50 Гц и максимальных значениях индукции			Удельное электрическое сопротивление, 10 <sup>-8</sup> Ом·м
		500	1 000	2 500	5 000	10 000	30 000	1,0	1,5	1,7	
		не менее						не более			
Горячекатаные стали											
1211	0,5	—	—	1,53	1,64	1,74	2,0	3,3	7,7		25
1212	0,5	—	—	1,5	1,62	1,75	1,98	3,2	7,5		25
1213	0,5	—	—	1,5	1,62	1,75	1,98	2,8	6,5		25
1311	0,5	—	—	1,48	1,59	1,73	1,95	2,5	6,1		40
1312	0,5	—	—	1,48	1,59	1,73	1,95	2,2	5,3		40
1411	0,5	—	—	1,46	1,57	1,72	1,94	2,0	4,4		50
1411	0,35	—	—	1,46	1,57	1,71	1,92	1,6	3,6		50
1412	0,5	—	—	1,46	1,57	1,71	1,92	1,8	3,9		50
1412	0,35	—		1,46	1,57	1,71	1,92	1,4	3,2		50
1511	0,5	—	1,3	1,46	1,57	1,71	1,9	1,55	3,5		60
1511	0,35	—	1,3	1,46	1,57	1,7	1,9	1,35	3,0		60
1512	0,5	—	1,29	1,45	1,56	1,69	1,89	1,4	3,1		60
1512	0,35	—	1,29	1,45	1,56	1,69	1,89	1,2	2,8		60
1513	0,5	—	1,29	1,44	1,56	1,69	1,89	1,25	2,9		60
1513	0,35	—	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	1,05	2,5		60
1514	0,5	—	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	1,15	2,7		60
1514	0,35		1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	0,9	2,2		60
1521	0,35	1,21	1,3	1,44	—	—	—	19,0	—		57
Холоднокатаные стали											
1211	0,5	—	—	1,55	1,64	1,76	2,0	2,5	5,8		25

Таблица П.5

## Коэффициент контуров электродинамических усилий

Эскиз расположения проводника	Коэффициент контура электродинамических усилий
	<p>Проводники параллельные конечной длины (расположение любое):</p> $k_{1/2} = \frac{(d_1 + d_2) - (s_1 + s_2)}{a}$
	<p>Проводники конечной длины, расположенные под прямым углом друг к другу:</p> $k_{1/2} = \ln \frac{(d_1 + d_{12})(d_2 + d_{22})}{(s_1 + s_{12})(s_2 + s_{22})}$
	<p>Проводники конечной длины, расположенные в одной плоскости под углом <math>\alpha</math> (верхние знаки для <math>\alpha &lt; 90^\circ</math>, нижние – для <math>\alpha &gt; 90^\circ</math>):</p> $k_{1/2} = \frac{1 + \cos \alpha}{\sin \alpha} \times \ln \frac{(d \pm d')(d \mp d'')}{(s_1 + s')(s_2 + s'')}$
	<p>Проводники расположены в одной плоскости под прямым углом. Проводник 2 бесконечной длины:</p> $k_{1/2} = 2 \ln \frac{L}{l}$

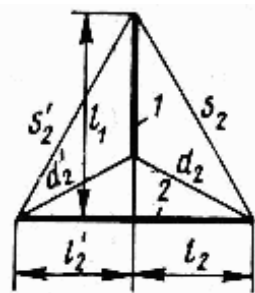
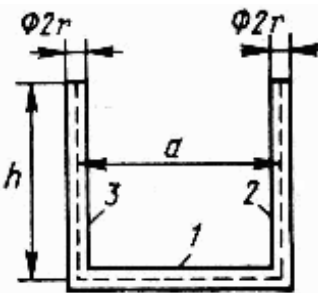
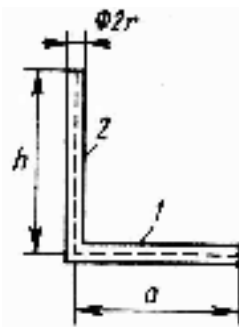
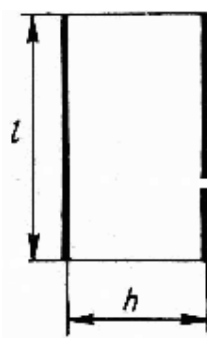
Эскиз расположения проводника	Коэффициент контура электродинамических усилий
	<p>Проводники конечной длины, расположенные в одной плоскости под прямым углом:</p> $k_{1/2} = \ln \left( \frac{l_1}{l_2} \right)^2 \cdot \frac{(d_1 + l_2)(d_2' + l_2')}{(s_2 + l_2)(s_2' + l_2')}$
	<p>Проводники круглые, расположенные в одной плоскости под прямым углом:</p> $k_1 = k_{1/2} + k_{1/3}, \quad k_1 = 2 \left( \ln \frac{2b}{1 + \sqrt{1 + c^2}} + 0,25 \right),$ <p>где <math>b = \frac{a}{r}</math>; <math>c = \frac{a}{h}</math></p>
	<p>Проводники круглые, расположенные в одной плоскости под прямым углом:</p> $k_{1/2} = 2 \left( \ln \frac{2b}{1 + \sqrt{1 + c^2}} + 0,25 \right),$ <p>где <math>b = \frac{a}{r}</math>; <math>c = \frac{a}{h}</math></p>
	<p>Параллельные проводники одинаковой длины:</p> $k_{1/2} = \frac{2l}{h} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{h}{l} \right)^2} - \frac{h}{l} \right]$

Таблица П.6

Формулы для расчета магнитных проводимостей  
и удельных магнитных проводимостей воздушных промежутков

Конструкция	Магнитная проводимость воздушного зазора
Обращенные друг к другу цилиндрические полюса диаметром $d$	С учетом выпучивания потока с торца $\Lambda_{\delta} = \mu_0 \left( \frac{\pi d^2}{4\delta} + 0,48d + \frac{0,36d^2}{2,4d + \delta} \right)$
Обращенные друг к другу прямоугольные полюса с поперечными размерами $a$ и $b$	С учетом выпучивания потока с торца $\Lambda_{\delta} = \frac{\mu_0}{\delta} \left( a + \frac{0,307\delta}{\pi} \right) \left( b + \frac{0,307\delta}{\pi} \right)$
Концентрические полюса толщиной $a$ , шириной $b$ и радиусом $r$	Без учета потока выпучивания $\Lambda_{\delta} = \mu_0 a \beta / \ln(1 + \delta / r),$ <p>где <math>\beta = 2 \arcsin(b / 2r) - \alpha</math>; <math>\alpha</math> – угол сдвига между осью полюсов и осью якоря</p>
Клапанный электромагнит с цилиндрическим полюсом, имеющим полюсный наконечник (шляпку)	С учетом поля выпучивания с торца и боковой поверхности шляпки диаметром $d_{\text{пн}}$ $\Lambda_{\delta} = \mu_0 \left( \frac{\pi d_{\text{пн}}^2}{4\delta} \chi_1 + 0,96d_{\text{пн}} + \frac{\pi d_{\text{пн}}}{0,69\delta / h_{\text{пн}} + 0,63} \right),$ <p>где <math>\chi_1 = 2\rho_1(\rho_1 - \sqrt{\rho_1^2 - 1})</math>; <math>\rho_1 = 2R_0 / d_{\text{пн}}</math>; <math>R_0</math> – расстояние от оси вращения якоря до оси полюса</p>
Броневой электромагнит с внутренним диаметром кожуха $D$	С учетом поля выпучивания с торцов и боковой поверхности цилиндрических полюсов диаметром $d$ $\Lambda_{\delta} = \mu_0 \left( \frac{\pi d^2}{4\delta} + 0,58d + \frac{x d}{0,22\delta + 0,4x} \right),$ <p>где <math>x = (D - d) / \pi - \delta / 2</math></p>
Конструкция	Удельная проводимость
Параллельные цилиндры одинакового диаметра	$\Lambda_{\sigma} = \mu_0 \frac{\pi}{\ln(n + \sqrt{n^2 - 1})},$ <p>где <math>n = h / (2r)</math>, <math>h</math> – расстояние между осями цилиндров; <math>r</math> – радиус цилиндра</p>

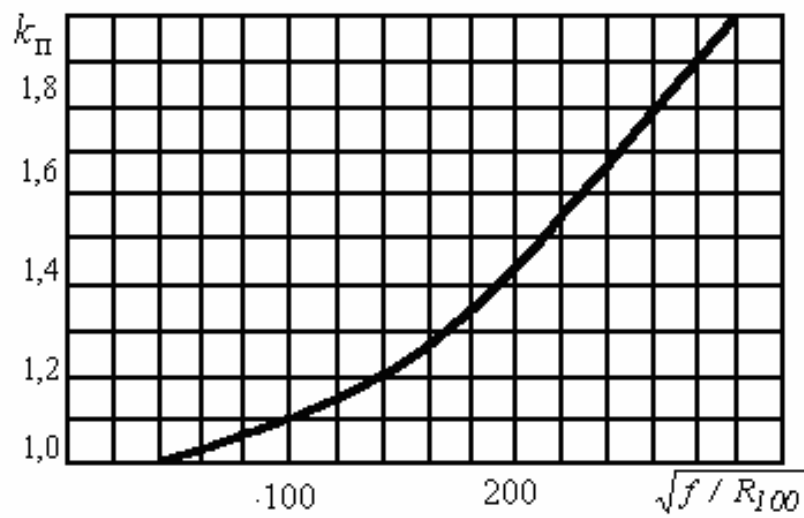


Рис. П.1. Зависимость коэффициента поверхностного эффекта для сплошных круглых немагнитных проводников от параметра  $\sqrt{f / R_{100}}$

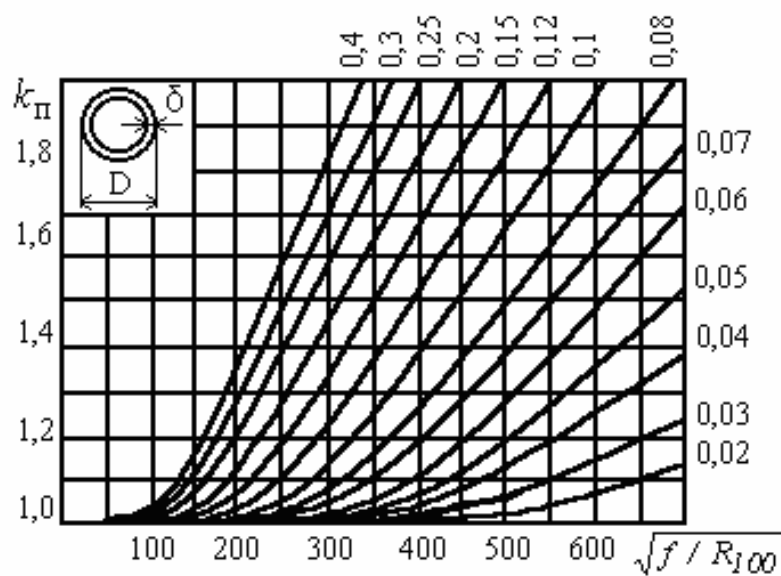


Рис. П.2. Зависимость коэффициента поверхностного эффекта для полых трубчатых проводников из немагнитного материала с различными соотношениями  $\delta / D$  и  $\sqrt{f / R_{100}}$

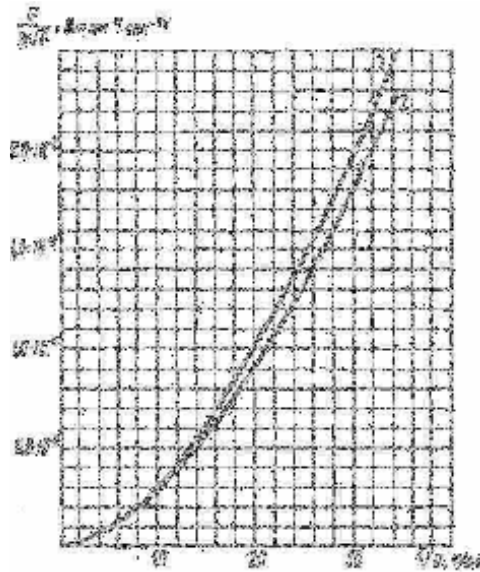


Рис. П.3. Кривая зависимости  $\frac{P}{S\sqrt{f}} = \varphi\left(\frac{I}{U}\right)$

*Примечание.* Этой кривой можно пользоваться для расчета потерь в стальных проводниках, когда величина тока такова, что значение  $H \geq H_{\mu_{\text{max}}}$  соответствующего  $\mu_{r\text{max}}$  и размеры поперечного сечения ферромагнитной части в любом направлении не меньше удвоенной глубины проникновения потока.

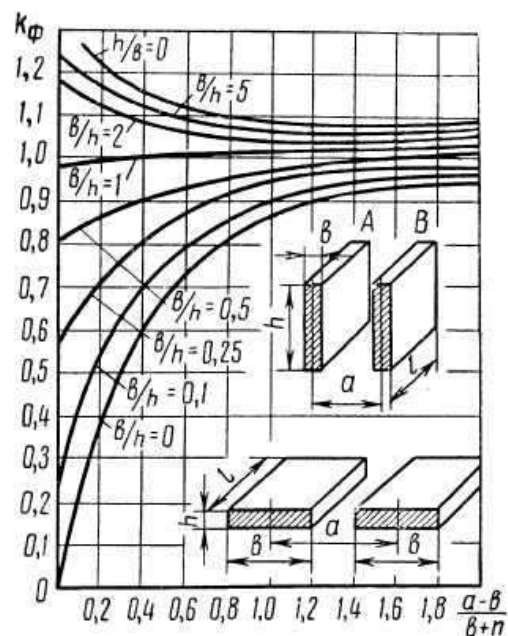


Рис. П.4. Кривая зависимости  $k_{\phi} = \varphi$



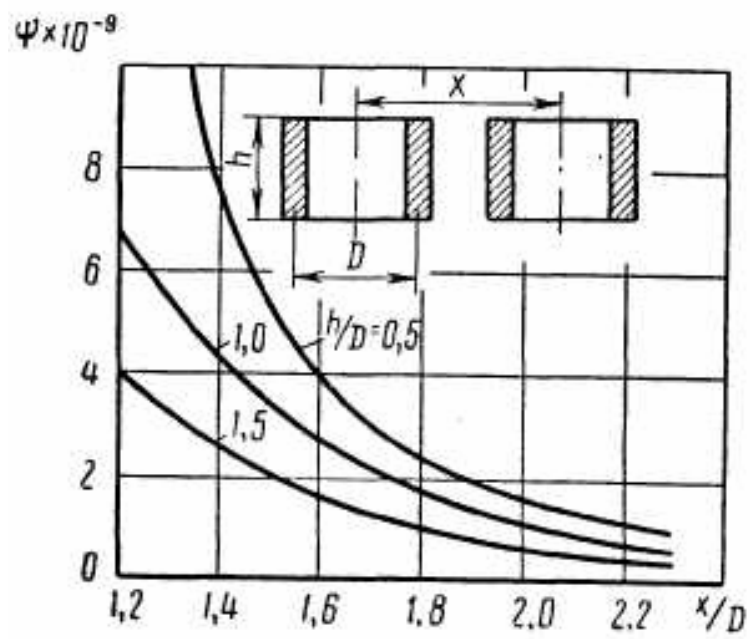
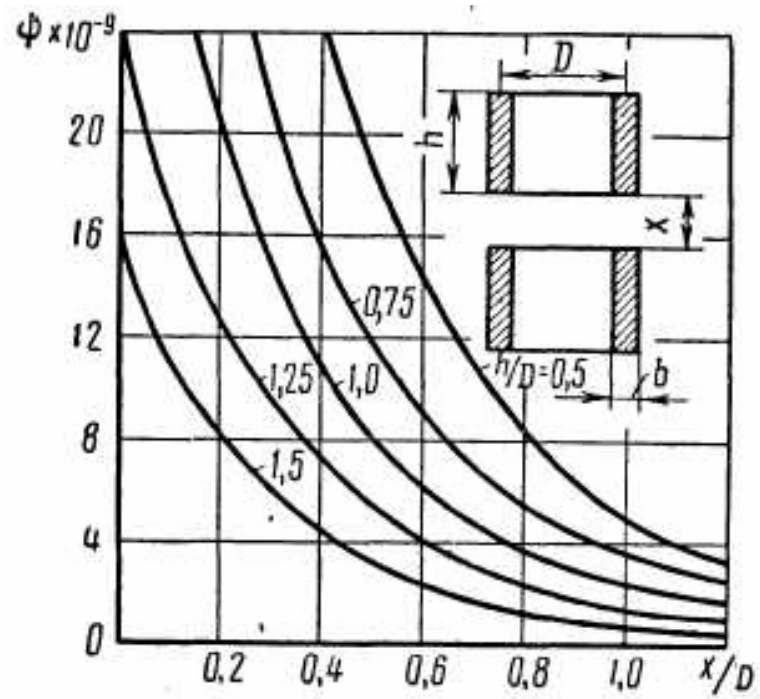


Рис. П.5. Кривые Двайта для определения производной  $\Psi = \frac{dM}{dx}$ :

$h$  – высота катушек;  $D$  – средний диаметр

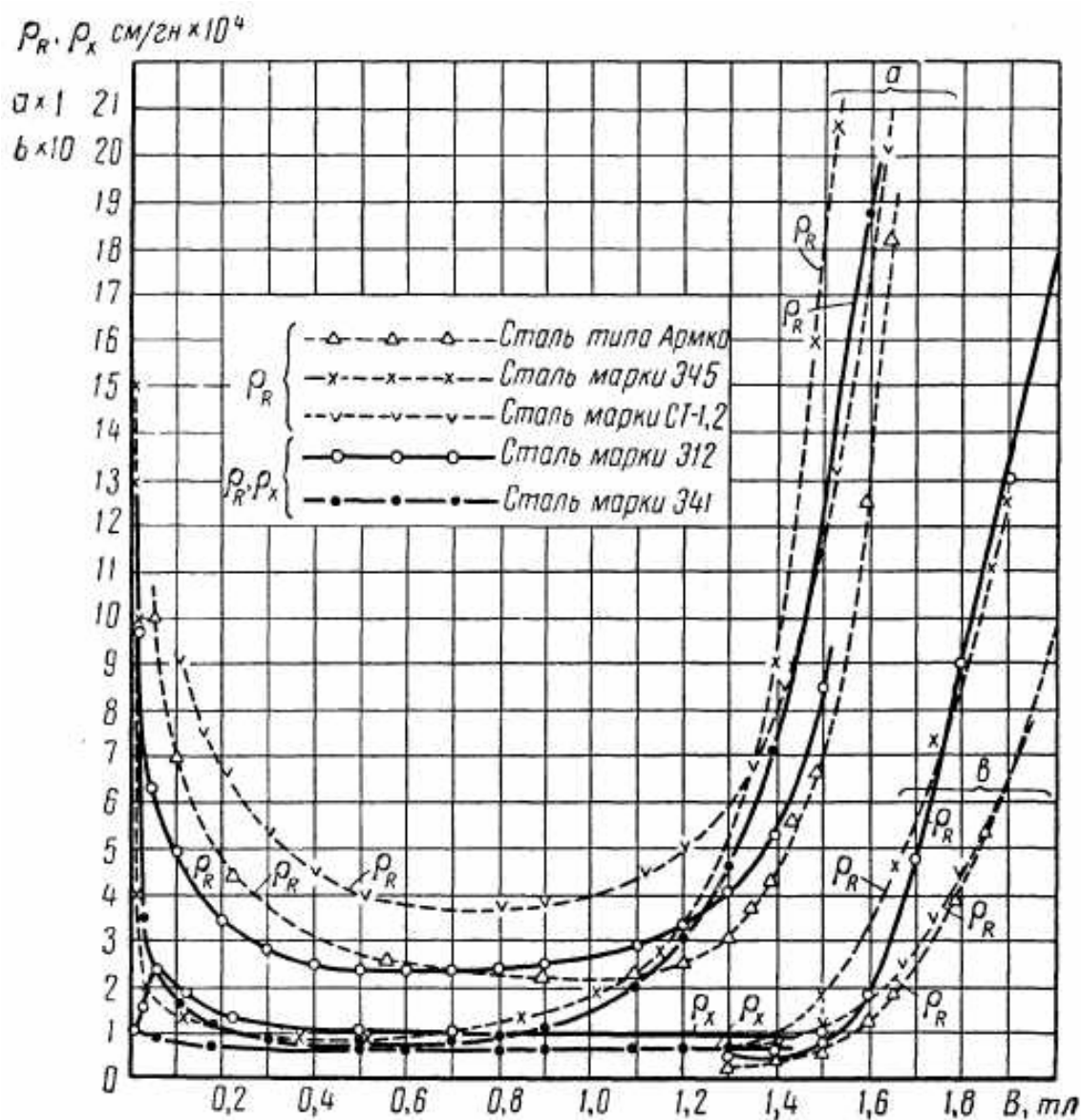


Рис. П.6. Кривые удельных активных и реактивных магнитных сопротивлений стали различных марок в функции магнитной индукции (для сталей Э12 и Э41 толщина листа – 0,5 мм, частота – 50 Гц)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буткевич Г.В. Задачник по электрическим аппаратам: учеб. пособие / Г.В. Буткевич, В.Г. Дегтярь, А.Г. Сливинская. – М.: Высш. шк., 1987. – 232 с.
2. Волошин С. Отечественным твердотельным реле – быть! // Компоненты и технологии. – 2004. – № 38. – С. 14–19.
3. Кляйн Р.Я. Электрические и электронные аппараты. Ч. III: Силовые электронные аппараты. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 233 с.
4. Кукеков Г.А. Полупроводниковые электрические аппараты / Г.А. Кукеков, К.Н. Васерина, В.П. Лунин. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
5. Могилевский Г.В. Гибридные электрические аппараты низкого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 232 с.
6. Основы теории электрических аппаратов / И.С. Таев, Б.К. Буль, А.Г. Годжелло, А.Г. Сливинская, А.А. Чунихин, В.Г. Дегтярь. – М.: Высш. шк., 1987. – 352 с.
7. Основы теории электрических аппаратов / Б.К. Буль, Г.В. Буткевич, А.Г. Годжелло и др.; под ред. Г.В. Буткевича. – М.: Высш. шк., 1970. – 600 с.
8. Розанов Ю.К. Основы силовой электроники. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 296 с.
9. Розанов Ю.К. Электрические и электронные аппараты. – М.: Информэлектро, 2001. – 412 с.
10. Таев И.С. Электрические аппараты управления. – М.: Высш. шк., 1984. – 247 с.
11. Чунихин А.А. Аппараты высокого напряжения / А.А. Чунихин, М.А. Жаворонков. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 432 с.
12. Чунихин А.А. Электрические аппараты. – М.: Альянс, 2008. – 720 с.
14. Электрические и электронные аппараты: учебник в 2-х т. Т. 2. Силовые электронные аппараты / А.П. Бурман, А.А.Кваснюк, Ю.С. Коробков, Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий; под ред. Ю.К. Розанова. – М.: Академия, 2010. – 315 с.
14. Электрические и электронные аппараты / под ред. Ю.К. Розанова. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 752 с.
15. Электромеханические аппараты автоматики / Б.К. Буль, О.Б. Буль, В.А. Азанов, В.Н. Шоффа. – М.: Высш. шк., 1988. – 303 с.

Учебное издание

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ

Учебное пособие

Состаивитель  
СИПАЙЛОВА Надежда Юрьевна

Редактор *Н.Т. Синельникова*

Компьютерная верстка *Л.А. Егорова*

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии  
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати                      Формат 60×84/16.

Бумага «Снегурочка». Печать Хероx.

Усл. печ. л. 13,72. Уч.-изд. л. 12,42.


Заказ                      . Тираж                      экз.



Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества

Издательства Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту BS EN ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.  
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, [www.tpu.ru](http://www.tpu.ru)