

М. Ванюшин

# ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ  
И НЕ ТОЛЬКО...



**Н и Т**  
ИЗДАТЕЛЬСТВО

**М. Ванюшин**

# **ЗАНИМАТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

**ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ  
И НЕ ТОЛЬКО...**



---

**Наука и Техника, Санкт-Петербург  
2016**

Ванюшин М.

**Занимательная электроника и электротехника для начинающих и не только... —**

СПб.: Наука и Техника, 2016. — 352 с.

**ISBN 978-5-94387-845-9**

В современном мире выросла роль технических специальностей, связанных с электроникой и электротехникой. Освоить их самостоятельно станет легче, если есть под рукой будет хорошая практическая книга-самоучитель.

Электротехника и электроника в книге рассматривается пошагово от самых азов. Если материал каких-то Шагов вам знаком, смело переходите к следующему шагу. В книге нет «теории ради теории». Изложено лишь самое необходимое, что позволит чувствовать себя уверенно при практической работе с электротехникой и электроникой. Есть в книге и необходимые базовые формулы, без которых не понять, как работает электротехника.

А основная часть самоучителя — практика, которую с этой книгой можно легко освоить самостоятельно в ходе экспериментов. Помогут описания и рисунки практических работ в домашних условиях при помощи легкодоступных для каждого приборов и материалов.

Книга проиллюстрирована мультимедийными роликами, которые можно бесплатно посмотреть или скачать с сайта автора книги «Электрокласс» ([www.eleczon.ru](http://www.eleczon.ru)) в разделе «Основы электротехники и электроники». Они помогут в освоении материала самоучителя.

Это лучший самоучитель для тех, кто делает первые шаги в освоении практической электроники и электротехники.



9 785943 878459

**ISBN 978-5-94387-845-9**

Автор и издательство не несут ответственности за возможный ущерб, причиненный в ходе использования материалов данной книги.

Контактные телефоны издательства  
(812) 412-70-25, 412-70-26

Официальный сайт: [www.nit.com.ru](http://www.nit.com.ru)

© Ванюшин М.

© Наука и Техника (оригинал-макет), 2016

ООО «Наука и Техника».

Лицензия № 000350 от 23 декабря 1999 года.

198097, г. Санкт-Петербург, ул. Маршала Говорова, д. 29.

Подписано в печать . Формат 70×100 1/16.

Бумага газетная. Печать офсетная. Объем 22 п. л.

Тираж 1000 экз. Заказ №

Отпечатано с готовых файлов заказчика  
в АО «Первая Образцовая типография»  
филиал «УЛЬЯНОВСКИЙ ДОМ ПЕЧАТИ»  
432980, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Вместо предисловия .....	13
--------------------------	----

От автора .....	15
-----------------	----

## ПЕРВЫЙ ШАГ

Знакомьтесь: КИРПИЧКИ, из которых состоит электротехника .....	16
--	----

Сделаем ПЕРВЫЙ шаг в электронику и электротехнику. В качестве первого шага вы познакомитесь с основами электротехники. Узнаете о происхождении электричества. Изучите проводники, диэлектрики, конденсаторы, индуктивности и освоите базовые законы электротехники: Ома и Кулона. А в завершении приводятся контрольные вопросы, которые помогут самостоятельно оценить уровень освоения материала.

## ВТОРОЙ ШАГ

Познакомимся с ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ .....	42
---------------------------------------	----

Сделав ВТОРОЙ шаг, вы познакомитесь с постоянным током. Рассмотрите зависимости сопротивлений, последовательное, параллельное и смешанное соединение, зависимости тока, работу и мощность. Изучите расчет цепей и их режимы. Познакомитесь с химическими источниками. И в завершении — ответите на вопросы для самотестирования.

## ТРЕТИЙ ШАГ

А теперь познакомимся с МАГНИТНЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ .....	103
--	-----

Сделав ТРЕТИЙ шаг, вы познакомитесь с магнетизмом. Рассмотрите такие вопросы: магниты и их свойства, напряженность магнитного тока, закон полного тока, взаимодействие проводников с токами, гистерезис, электромагниты. Освоите вихревые токи, самоиндукцию, энергию магнитного поля, расчет индуктивности, взаимоиндукцию. И в завершении — ответите на вопросы для самотестирования.

## ЧЕТВЕРТЫЙ ШАГ

Начинаем изучать ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК .....	135
---------------------------------------	-----

Сделав ЧЕТВЕРТЫЙ шаг, вы познакомитесь с переменным током, который наиболее широко используется в быту, рассмотрев такие вопросы. Получение ЭДС. Синусоидальная ЭДС. Активное сопротивление, катушка индуктивности в цепи переменного тока. Активное, индуктивное и емкостное сопротивления в цепи переменного тока. Параллельное соединение реактивных сопротивлений. Резонанс токов. Мощность. И в завершении — ответите на вопросы для самотестирования.



## ПЯТЫЙ ШАГ

### Пришла пора изучить ТРЕХФАЗНЫЙ ТОК ..... 162

Сделав ПЯТЫЙ шаг, вы познакомитесь с трехфазным током, который экономичнее однофазного. Вы будете знать, что такое трехфазные генераторы, как нужно производить соединение обмоток, включать нагрузки в сеть трехфазного тока. Рассмотрите мощность трехфазной цепи, вращающееся магнитное поле. И в завершении — ответите на вопросы для самотестирования.

## ШЕСТОЙ ШАГ

### Интересно, а как работают ТРАНСФОРМАТОРЫ ..... 182

Сделав ШЕСТОЙ шаг, вы познакомитесь с трансформаторами, устройствами, которые снижают или повышают напряжение и ток, развязывают цепи. Вам будет понятен их принцип действия, устройство и работа. Рассмотрите однофазные и трехфазные трансформаторы, автотрансформаторы, измерительные трансформаторы. Произведете опыты холостого хода и короткого замыкания. И в завершении — ответите на вопросы для самотестирования.

## СЕДЬМОЙ ШАГ

### Будем знакомы: АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ ..... 208

Сделав СЕДЬМОЙ шаг, вы познакомитесь с асинхронными двигателями, которые отличаются простотой конструкции и обслуживания. Освоите принцип действия и устройство асинхронного двигателя, его работу под нагрузкой, вращающий момент и рабочие характеристики. Рассмотрите пуск в ход, регулирование частоты вращения однофазных и трехфазных асинхронных двигателей. И в завершении — ответите на вопросы для самотестирования.

## ВОСЬМОЙ ШАГ

### Знакомьтесь: СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ГЕНЕРАТОРЫ ..... 234

Сделав ВОСЬМОЙ шаг, вы изучите синхронные машины (двигатели и генераторы), скорость вращения ротора в которых определяется частотой тока сети и числом пар полюсов. Вы рассмотрите принцип действия и устройство синхронного генератора и двигателя, их работу под нагрузкой. И в завершении — ответите на вопросы для самотестирования.

## ДЕВЯТЫЙ ШАГ

### Как устроены и работают МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ..... 249

Сделав ДЕВЯТЫЙ шаг, вы познакомитесь с машинами (двигателями и генераторами) постоянного тока, рассмотрев такие вопросы. Принцип действия и устройство генератора постоянного тока. Обмотки якорей и ЭДС постоянного тока. Магнитное поле машины при нагрузке постоянного тока. Способы возбуждения генераторов. Характеристики генераторов постоянного тока. Пуск, характеристики, регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока. Потери и КПД машин постоянного тока. И в завершении — ответите на вопросы для самотестирования.

## ДЕСЯТЫЙ ШАГ

### Знакомьтесь: ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ И ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ .... 286

Сделав ДЕСЯТЫЙ шаг, вы познакомитесь с полупроводниковыми приборами (диодами, транзисторами, тиристорами, микросхемами), которые составляют основу любой электронной схемы. Узнаете вы и о газоразрядных приборах: что такое ионизация газа и электрический заряд, как работают фотоэлементы и многое другое. И в завершении — ответите на вопросы для самотестирования.

## ОДИННАДЦАТЫЙ ШАГ

### Наконец, мы добрались до рассмотрения

### УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОНИКИ ..... 316

В ходе финишного шага вы познакомитесь с практическими схемами типовых устройств электроники: выпрямителями, сглаживающими фильтрами, стабилизаторами, усилителями низкой частоты, генераторами гармонических колебаний, реле. А в завершении главы сможете ответить на вопросы для самотестирования. Теперь вы ПОДГОТОВЛЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИК! Поздравляю!

### Послесловие ..... 340

### Ответы тестирования ..... 349

### На веб-страницах ..... 350

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Вместо предисловия</b> .....	<b>13</b>
<b>От автора</b> .....	<b>15</b>
<b>ПЕРВЫЙ ШАГ. Знакомьтесь: КИРПИЧКИ, из которых состоит электротехника</b> .....	<b>16</b>
1.1. Кратко о происхождении электричества .....	16
Взаимодействие тел .....	16
Пьезоэффект .....	18
Фотоэффект .....	19
Термоэффект .....	20
1.2. Проводники и их сопротивление .....	22
Зависимость сопротивления от свойств проводника .....	22
Взаимодействие движущихся электронов с ионами кристаллической решетки .....	24
Зависимость сопротивления от длины .....	24
Зависимость сопротивления от площади поперечного сечения .....	25
Реостаты, резисторы, потенциометры .....	27
Небольшая задача о резисторах .....	28
1.3. Диэлектрики и емкость .....	28
Диэлектрики .....	28
Заряд и разряд конденсатора .....	30
Соединение конденсаторов .....	32
1.4. Ваш первый шаг в электронику .....	32
Закон Кулона .....	32
Электрический ток и внутреннее сопротивление .....	34
1.5. Вопросы для тестирования .....	38
<b>ВТОРОЙ ШАГ. Познакомимся с ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ</b> .....	<b>42</b>
2.1. Зависимости сопротивлений .....	42
Зависимость сопротивления от положения движка .....	42
Зависимость сопротивления проводника от температуры .....	43
2.2. Последовательное соединение .....	45
2.3. Параллельное и смешанное соединение .....	48
О чем нам говорит первый закон Кирхгофа .....	48
Параллельное соединение резисторов .....	50
Смешанное соединение сопротивлений .....	51
Нелинейные сопротивления .....	52
2.4. Зависимости тока .....	53
Зависимость силы тока от напряжения .....	53
Зависимость силы тока от сопротивления .....	56
2.5. Расчет цепей .....	59
Второй закон Кирхгофа .....	59
Метод эквивалентного генератора .....	60

Сложные электрические цепи .....	62
Метод узловых напряжений .....	65
Метод контурных токов.....	66
2.6. Работа и мощность .....	68
Что такое мощность .....	68
О чем нам говорит закон Ленца-Джоуля.....	70
Нагревание проводников электрическим током .....	71
Расчет сечения проводов.....	71
2.7. Режимы цепи .....	73
Характерные режимы работы сети .....	73
Соотношение мощностей в электрической цепи .....	75
Расчет мощности и КПД в цепи постоянного тока с переменным сопротивлением и источником компьютерного блока питания .....	77
2.8. Химические источники .....	79
Первое знакомство .....	79
Первый закон Фарадея .....	80
Второй закон Фарадея.....	81
Гальванические элементы .....	81
Аккумуляторы .....	84
Щелочные аккумуляторы .....	87
Приведение щелочных аккумуляторных батарей в рабочее состояние ....	89
Приготовление электролита для щелочных аккумуляторных батарей.....	89
Проверка плотности электролита аккумуляторных батарей.....	91
Проверка уровня электролита аккумуляторных батарей.....	92
Смена электролита щелочных аккумуляторов.....	92
Заряд и разряд щелочных аккумуляторных батарей.....	93
Контрольно-тренировочный цикл щелочных аккумуляторных батарей....	94
Приведение кислотных аккумуляторных батарей в рабочее состояние ....	95
Приготовление электролита для кислотных аккумуляторных батарей ....	96
Заряд и разряд кислотных аккумуляторных батарей .....	96
Контрольно-тренировочный цикл кислотных аккумуляторных батарей....	97
2.9. Вопросы для тестирования .....	99
<b>ТРЕТИЙ ШАГ. А теперь познакомимся с МАГНИТНЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ .....</b>	<b>103</b>
3.1. Магниты и их свойства.....	103
Первое знакомство .....	103
Магнитное поле электрического тока .....	105
Магнитное поле соленоида.....	106
Проводник с током в магнитном поле. Магнитная индукция.....	107
3.2. Напряженность магнитного тока. Закон полного тока .....	109
Магнитодвижущая сила.....	109
Напряженность магнитного поля.....	110
Магнитная проницаемость. Магнитный поток .....	111
3.3. Взаимодействие проводников с токами. Гистерезис.....	113
Магнитные поля вокруг проводников .....	113

Абсолютная магнитная проницаемость .....	114
Электромагнит .....	114
Явление гистерезиса .....	115
Коэрцитивная сила .....	116
Петля гистерезиса .....	117
Особенности ферромагнитных материалов .....	117
3.4. Электромагниты. Вихревые токи .....	118
Полярность электромагнита .....	118
Электромагнитная индукция .....	119
Вихревые токи .....	123
3.5. Самоиндукция. Расчет индуктивности .....	124
Что такое самоиндукция .....	124
Самоиндукция в прямолинейных проводниках .....	125
Единицы индуктивности .....	126
Расчет самоиндуктивности .....	126
Расчет катушек индуктивности .....	127
3.6. Энергия магнитного поля. Взаимоиндукция .....	130
3.7. Вопросы для тестирования .....	133
<b>ЧЕТВЕРТЫЙ ШАГ. Начинаем изучать ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК .....</b>	<b>135</b>
4.1. Получение ЭДС. Синусоидальная ЭДС .....	135
Получение переменной электродвижущей силы .....	135
Синусоидальная движущая сила .....	139
4.2. Активное сопротивление, катушка индуктивности в цепи переменного тока .....	141
Активное сопротивление в цепи переменного тока .....	141
Действующие значения тока и напряжения .....	144
Катушка индуктивности в цепи переменного тока .....	144
4.3. Активное, индуктивное и емкостное сопротивления в цепи переменного тока .....	147
Цепь переменного тока, содержащая активное и индуктивное сопротивления .....	147
Емкость в цепи переменного тока .....	149
Цепь переменного тока, содержащая активное и емкостное сопротивление .....	151
Цепь переменного тока, содержащая активное, индуктивное и емкостное сопротивления .....	153
4.4. Параллельное соединение реактивных сопротивлений. Резонанс токов. Мощность .....	155
Параллельное соединение реактивных сопротивлений. Резонанс токов ..	155
4.5. Вопросы для тестирования .....	160
<b>ПЯТЫЙ ШАГ. Пришла пора изучить ТРЕХФАЗНЫЙ ТОК .....</b>	<b>162</b>
5.1. Трехфазные генераторы. Соединение обмоток .....	162
Работа трехфазные генераторы .....	162
Соединение обмоток генератора .....	165

5.2. Включение нагрузки в сеть трехфазного тока. ....	168
Включение нагрузки звездой. ....	168
Включение нагрузки треугольником. ....	170
Защита трехфазной сети предохранителями. ....	171
5.3. Мощность трехфазной цепи. Вращающееся магнитное поле. ....	172
Мощность трехфазной цепи. ....	172
Вращающееся магнитное поле. ....	175
5.4. Вопросы для тестирования. ....	180
<b>ШЕСТОЙ ШАГ. Интересно, а как работают ТРАНСФОРМАТОРЫ. ....</b>	<b>182</b>
6.1. Принцип действия, устройство и работа. ....	182
Общие сведения о трансформаторах. ....	182
Принцип действия и устройство трансформатора. ....	184
Работа трансформатора под нагрузкой. ....	187
6.2. Трехфазные трансформаторы. Опыты х.х. и к.з. ....	191
Трехфазные трансформаторы. ....	191
Опыты холостого хода и короткого замыкания. ....	194
Определение рабочих свойств трансформаторов по данным опытов х.х. и к.з. ....	196
Опыт холостого хода однофазного трансформатора. ....	198
Опыт короткого замыкания однофазного трансформатора. ....	199
Опыт нагрузки однофазного трансформатора. ....	200
6.3. Автотрансформаторы и измерительные трансформаторы. ....	200
Автотрансформаторы. ....	200
Измерительные трансформаторы. ....	204
6.4. Вопросы для тестирования. ....	206
<b>СЕДЬМОЙ ШАГ. Будем знакомы: АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ. ....</b>	<b>208</b>
7.1. Принцип действия и устройство асинхронного двигателя. ....	208
Общие сведения об электрических машинах. ....	208
Принцип действия электрических машин. ....	209
Принцип действия асинхронного двигателя. ....	210
Устройство асинхронного двигателя. ....	213
7.2. Работа под нагрузкой, вращающий момент и рабочие характеристики асинхронного двигателя. ....	216
Работа асинхронного двигателя под нагрузкой. ....	216
Вращающий момент асинхронного двигателя. ....	218
Рабочие характеристики асинхронного двигателя. ....	221
7.3. Пуск в ход и регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей. Однофазные асинхронные двигатели. ....	223
Пуск в ход асинхронных двигателей. ....	223
Двигатели с улучшенными пусковыми свойствами. ....	226
Регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей. ..	228
Однофазные асинхронные двигатели. ....	230
7.4. Вопросы для тестирования. ....	232



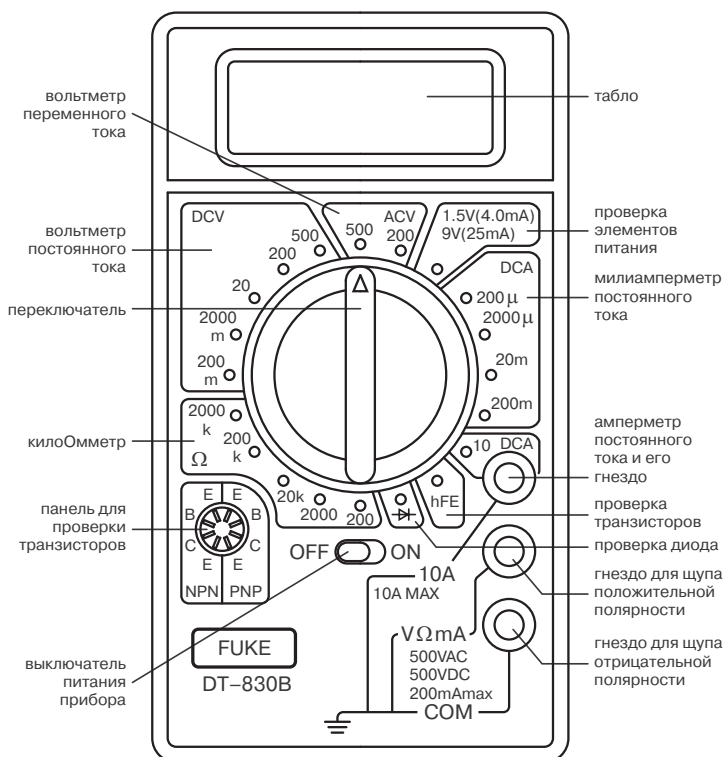
<b>ВОСЬМОЙ ШАГ. Знакомьтесь: СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ГЕНЕРАТОРЫ .....</b>	<b>234</b>
8.1. Принцип действия и устройство синхронного генератора .....	234
Схема синхронного генератора. ....	234
Устройство синхронного генератора .....	238
8.2. Работа синхронного генератора под нагрузкой .....	240
8.3. Синхронные двигатели .....	244
8.4. Вопросы для тестирования .....	247
<b>ДЕВЯТЫЙ ШАГ. Как устроены и работают МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА. ....</b>	<b>249</b>
9.1. Принцип действия и устройство генератора постоянного тока. ....	249
9.2. Обмотки якорей и ЭДС машины постоянного тока. ....	253
9.3. Магнитное поле машины при нагрузке постоянного тока .....	257
Магнитное поле при нагрузке .....	257
Коммутация тока .....	259
9.4. Способы возбуждения генераторов. ....	262
Характеристики генераторов постоянного тока .....	262
Работа машины постоянного тока в режиме генератора. ....	262
Способы возбуждения генераторов постоянного тока .....	265
Характеристики генераторов постоянного тока .....	267
9.5. Пуск, характеристики, регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока. Потери и КПД машин постоянного тока .....	274
Работа машины постоянного тока в режиме двигателя .....	274
Пуск двигателей постоянного тока .....	276
Характеристики двигателей постоянного тока .....	279
Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока. ....	282
Потери и КПД машин постоянного тока. ....	283
9.6. Вопросы для тестирования .....	284
<b>ДЕСЯТЫЙ ШАГ.</b>	
<b>Знакомьтесь: ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ И ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ. ....</b>	<b>286</b>
10.1. Первое знакомство с полупроводниковыми приборами .....	286
Электропроводность полупроводников. ....	286
Полупроводниковые диоды .....	290
10.2. Транзисторы. ....	293
Первое знакомство .....	293
Принцип действия транзистора .....	294
Схемы включения транзисторов. ....	296
Характеристики транзистора .....	298
Плоскостной германиевый транзистор. ....	299
Сравнение транзисторов и электронных ламп .....	300
10.3. Тиристоры. ....	301
Первое знакомство .....	301
Принцип действия тиристора .....	301
Устройство тиристора .....	303
10.4. Ионизация газа и электрический заряд. Фотоэлементы .....	303

Ионизация газа и электрический заряд .....	303
Тлеющий разряд .....	305
Дуговой разряд .....	306
Газотрон .....	307
Фотоэлементы с внешним фотоэффектом .....	309
Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом и с запирающим слоем .....	311
10.4. Вопросы для тестирования .....	314
 <b>ОДИННАДЦАТЫЙ ШАГ.</b>	
<b>Наконец, мы добрались до рассмотрения УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОНИКИ .....</b>	<b>316</b>
11.1. Выпрямители .....	316
Первое знакомство .....	316
Схемы соединения вентиляей .....	317
Однофазная мостовая схема выпрямления .....	319
Трехфазная схема выпрямления .....	319
Кривые регулируемого выпрямленного напряжения .....	320
11.2. Сглаживающие фильтры. Стабилизаторы .....	322
Сглаживающие фильтры .....	322
Стабилизаторы напряжения .....	324
11.3. Усилители низкой частоты .....	326
Назначение и классификация .....	326
Основные параметры усилителей .....	327
Искажения сигнала .....	327
Обратная связь .....	328
Смещение в ламповых усилителях .....	328
Транзисторные усилители .....	330
11.4. Генераторы гармонических колебаний .....	332
11.5. Реле .....	334
11.6. Вопросы для тестирования .....	338
 <b>Послесловие .....</b>	<b>340</b>
 <b>Ответы тестирования .....</b>	<b>349</b>
 <b>На веб-страницах .....</b>	<b>350</b>



Перед вами универсальный измерительный прибор, который использовался автором книги при проведении опытов. Ознакомьтесь с органами управления этого мультиметра.

Показания приборов при замерах могут отличаться от показаний на картинках из-за погрешностей самих приборов и "излишних" сопротивлений проводов (в том числе проводов приборов) и контактов соединений.



## ВМЕСТО ПРЕДИСЛОВИЯ

«Образование дома? Это смешно!» — скажете вы. Смешного в этом ничего нет. Да, нелегко без педагога, без наставника. А вы знаете многих учителей, которые знают свое дело «от и до»? А как же они преподают?

Разумеется, преподают с помощью методических и учебных пособий, они всегда под рукой. Прочитал молодой педагог с вечера «материальчик» к предмету, как домашний урок и пошел со шпаргалкой на следующий день детей учить. Конечно, в процессе работы этот человек станет учителем и может быть не плохим. А станет он им благодаря книгам.

Почему бы нам с вами не попробовать учиться дома? Выгадал минутку, сел за стол, почитал, сегодня не получилось, завтра продолжил. Есть небольшое «но». Тот педагог доучивался и набирался опыта, потому что школа — это его основная работа, у него был стимул.

Стимул — это необходимое условие для всех начинаний. Где взять? Для этого разработаны некоторые уроки и методы обучения. **Начинать надо с выбора профессии, которая вам по душе.**

Не имеет значения, молоды вы или нет, учиться никогда не поздно. Много людей живет до преклонного возраста и жалеют о том, что не стали учиться тогда, когда думали, что уже поздно.

В 30—40 лет не задумываясь — вперед!

Есть такие моменты: работает человек, работает, время идет, а работа-то так себе, отпахал рабочее время, думая о прекрасном, да и ладно. А есть же в каждом стремление к чему-то индивидуальному, творческому, есть, наконец, мечты.

Подумайте, в каком направлении деятельности вы могли бы совмещать ваши желания с работой, а еще лучше, если работа и была бы воплощением ваших желаний.

Главным фактором в успехах нашей жизни является состояние души, уязвимое место, часто бывает причиной неудач и неразумных поступков.

Психологическое равновесие способствует присутствию радости и счастья в учебе, в работе, и вообще, в жизни.

Прежде чем вы делаете какое-либо решение, серьезное решение — «Куда пойти учиться?», «Кем пойти работать?», в первую очередь,

обращайте внимание на свои ощущения при рассмотрении сущности, основы, перспективы предмета своего выбора.

Ни в коем случае не должны влиять на ваше сознание месторасположение учебы или работы.

Ни советы (даже друзей, они также могут быть ошибочными), ни примеры, которые обычно неудачно приводятся, даже зарплата (в основном зарплата зависит не от сферы деятельности, а от должности, которую вы займете, если будете хорошо учиться и работать) не помогут.

Можно конечно прислушаться к человеку компетентному, являющемуся примером благополучия, опять же, это — его успехи, это — ему нравится его деятельность, а где же «Ваше»?

А «Ваше» внутри вас самих.

Вообще, как говорится — «сердце подскажет», но кажется — это работает не всегда, а скорее всего, не работает никогда.

Так что, отодвигайте деньги, советы, примеры и приметы в сторону и просто выбирайте то, что вам нравится, учитывая, что будете заниматься этим долго, может даже всю вашу счастливую жизнь.

Бывают моменты, когда материал плохо запоминается, но силы и желание не покинули вас, нужно снова повторять и повторять.

И в награду за ваше усердие будет огромная радость, которая дает толчок к следующим шагам обучения. В общем, человек «устроен так, что без стимула никак». Этим стимулом в образовании является положительный результат уже изученного.

Любой предмет, наука или курс выстроен ступенчато — от легкого к сложному, по-другому нельзя. Так вот, пропущенные ступени в процессе учебы оказывают большое влияние на конечный результат, знания становятся несвязанные, рыхлые, полные белых пятен. Необходимо полностью выучить очередной шаг, тем самым стимулируя себя, и быть затем готовым к следующим достижениям.

Надо помнить, что результат вашего труда — это ваш результат. Какой бы он ни был — плохой, хороший, «из ряда вон...» и т. д. — но он ваш, и каким ему быть зависит только от вас.

Конечно, помощником для человека всегда была книга.

## ОТ АВТОРА

У вас появляется прекрасная возможность овладеть фундаментальными знаниями в области электротехники и электроники. Не выходя из дома, получить серьезную практику ремонтных работ. Кому и для чего это нужно?

**Во-первых:** человеку, только начинающему жить. Человеку, у которого, впереди выбор профессии и выбор способа ее освоить. Для осуществления этого необходим психологический настрой, чтобы не сделать поспешных решений, которые чаще всего оказываются ошибочными.

Зная, в общих чертах, об уровне сложности изучаемого материала, об основных моментах и принципах будущей профессии, уверенный в себе молодой человек, примет обдуманное, правильное решение.

**Во-вторых:** это нужно тем людям, которые поняли, что оступились при выборе профессии и учебы. Учились, работали, а все без интереса. Сменить профессию тоже нелегко, но поверьте, намного легче, чем вы думаете, просто надо действовать пока не поздно. Если у вас сложилась такая ситуация, то сможете подготовить и настроить себя на перемены. Отнестись к этому, как к серьезному моменту вашей жизни. Читайте, готовьтесь.

**В-третьих:** для тех, кто решил изучать электротехнику и электронику окончательно и бесповоротно.

**Если хотя бы один из пунктов вам подходит, то просим ознакомиться!**

Скелетом книги служит классическая теория электротехники и самых первых шагов в электронику. Здесь присутствуют описания и рисунки практических работ в домашних условиях при помощи легкодоступных для каждого приборов и материалов.



## ЗНАКОМЬТЕСЬ: КИРПИЧКИ, ИЗ КОТОРЫХ СОСТОИТ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



*Сделаем ПЕРВЫЙ шаг в электронике и электротехнике. В качестве первого шага вы познакомитесь с основами электротехники. Узнаете о происхождении электричества. Изучите проводники, диэлектрики, конденсаторы, индуктивности и освоите базовые законы электротехники: Ома и Кулона. А в завершении приводятся контрольные вопросы, которые помогут самостоятельно оценить уровень освоения материала.*

### 1.1. Кратко о происхождении электричества

#### Взаимодействие тел

Образно рассмотрим, что это такое — электричество. Как известно все тела состоят из мельчайших частиц — молекул, молекулы из атомов, атомы еще из более мелких протонов, нейтронов, электронов. Каждая частица, молекула, тело имеет свой энергетический заряд. Тела с положительным (+) зарядом притягиваются к телам с отрицательным (–) зарядом, а если одноименные — (+) с (+) и (–) с (–), то отталкиваются (рис. 1.1).

Наблюдается тенденция движения.

Интенсивность этого движения частиц в веществах зависит от многих причин: деформация, воздействие света, нагревание, трение, химические реакции.



Рис. 1.1. Взаимодействие тел

Электроны движутся вокруг ядра и находятся от него на различных расстояниях, поэтому взаимодействие положительных зарядов протонов ядра с электронами неодинаково, оно ослабляется по мере удаления электрона от ядра (рис. 1.2).

Таким образом, может меняться число электронов, наиболее удаленных от ядра и наиболее слабо связанных с ядром.

Число электронов в атомах материалов можно изменить трением, нагреванием, с помощью света, деформации, химических реакций и т. д. Установлено, что из некоторых веществ под действием света вылетают электроны и эти вещества заряжаются положительным зарядом. Это явление называется **фотоэффектом**, на нем основан принцип работы фотоэлементов.

При нагревании металлов до определенной температуры скорости движения слабо связанных с ядром электронов достигают величин, при которых их кинетической энергии хватает, чтобы оторвать электроны от ядра. Электроны становятся свободными с отрицательными зарядами, а атомы металла, потерявшие электроны, обретают положительные заряды. Это явление называется **термоэлектронной эмиссией** и используется, в частности, в кинескопах телевизоров.

В химических источниках электрической энергии положительные и отрицательные полюсы образуются в результате переноса зарядов при химических реакциях (**аккумуляторы**). При механической деформации (сжатии, растяжении и т. д.) на поверхности некоторых кристаллических тел (например, кварца) возникают электрические заряды. Это явление называется **прямым пьезоэлектрическим эффектом**. При **обратном пьезоэффекте** кристалл деформируется под действием электроэнергии.

При этом образуются небольшие источники двух полярностей (+) и (-). Каждая полярность имеет свою величину — потенциал.

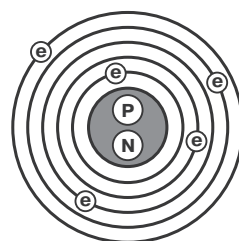


Рис. 1.2. Расположение электронов



### Определение.

*Запас энергии (потенциальная энергия) единицы количества электричества, находящейся в данной точке электрического поля, называется **потенциалом**.*

Чем больше потенциал, тем больше разница между (+) и (-). Так вот, эта разница потенциалов (+) и (-) — есть **электродвижущая сила (ЭДС)**.

В замкнутой цепи электрический ток протекает под действием электродвижущей силы (ЭДС) источника энергии. Электродвижущая сила возникает в источнике и при отсутствии тока в цепи, т. е. когда цепь разомкнута. При холостом ходе, т. е. при отсутствии тока в цепи, ЭДС равна разности потенциалов на зажимах источника энергии. Также как и разность потенциалов, ЭДС измеряется в **вольтах (В)**.

Как при замкнутой, так и при разомкнутой электрической цепи ЭДС непрерывно поддерживает разность потенциалов на зажимах источника энергии.

В наличии ЭДС можно убедиться, если присоединить к полюсам источника энергии (вместо линейных проводов) прибор, называемый **вольтметром**. Стрелка вольтметра при этом отклонится на некоторый угол. У цифрового прибора изменится значение на дисплее. Отклонение будет тем больше, чем больше ЭДС источника энергии.

Однако вольтметр покажет не величину ЭДС, а, как мы увидим дальше, напряжение на зажимах источника, которое также, как и ЭДС, измеряется в вольтах (В), киловольтах (кВ), милливольт (мВ):

**1 вольт = 1000 милливольт; 1000 вольт = 1 киловольт**

Можно представить эти источники в виде маленьких макетов больших источников электрической энергии, которые создал человек (генераторы, аккумуляторы, но об этом позже).

## Пьезоэффект

Ученые всего мира бьются над проблемой продления жизни источников энергии. И среди них Мартын Нунупаров, российский физик-теоретик и изобретатель, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией микроэлектроники Института общей физики РАН. Он изобрел оригинальное устройство, обеспечивающее микроэлектронику электричеством, — так называемый **пьезоконвертер**. Именно под таким названием этот предмет уже запатентован в России, США и еще 24 странах.

*«Всем известно, что два разнозаряженных предмета притягиваются», — объясняет физик. — «Но обычно сила этого притяжения мала и ненадежна. Я стал экспериментировать и выяснил: специальные полимерные пластинки, заряженные определенным образом, притягиваются друг к другу с силой в несколько килограммов! Притом, что они заряжены зарядом всего лишь в один микрокулон».*

Поясним: **пьезоэффект** — это свойство кристаллов некоторых веществ при сжатии изменять кристаллическую решетку и как результат выдавать электрический заряд очень большого напряжения. Впервые это свойство у кристаллов кварца еще в 1880 году обнаружили французские физики Жак и Поль Кюри. Сегодня известно более полутора тысяч веществ, обладающих такими свойствами, из них широко используются сегнетова соль и титанат бария. Самым распространенным на сегодняшний день прибором, в котором используется пьезоэффект, является **зажигалка**.

Искру, которую дает пьезоэлемент, надо еще «поймать и заставить работать с микропроцессором». Мартын Нунупаров придумал пьезоконвертер, состоящий из трансформатора, двух диодов и конденсатора. Опытный образец был готов через несколько месяцев. Гарантия — десять миллионов циклов. Причем никакого щелчка не слышно — кристалл сжимается беззвучно.

На сегодняшний день пьезоконвертер, дистанционные выключатели, безбатарейные датчики очень заинтересовали службы безопасности, шахтеров, пожарных, газовиков и нефтяников. Потому что они обеспечивают автономную беспроводную сигнализацию, в которой благодаря герметичности совершенно отсутствует возможность искрения (особенно это важно для шахтеров и пожарных, так как исключается риск взрыва). И никогда не надо менять батарейки.

О статическом электричестве ученые знали давно. Например, знаменитая Мария Склодовская-Кюри использовала это явление для изучения свойств магнитных материалов. Широко используются пьезоэлементы в качестве источников звука, датчиков вибрации, поляроидных пленок.

## Фотоэффект



### Определение.

**Фотоэлемент** — электронный прибор, в котором в результате поглощения энергии падающего на него оптического излучения генерируется ЭДС (фотоЭДС) или электрический ток (фототок).

Действие фотоэлемента основывается на **фотоэлектронной эмиссии** или **внутреннем фотоэффекте**.

Фотоэлемент, действие которого основано на фотоэлектронной эмиссии, представляет собой электровакуумный прибор с двумя элект-

тродам — фотокатодом и анодом (коллектором электронов), помещенными в вакуумированную либо газонаполненную стеклянную или кварцевую колбу.

Световой поток, падающий на фотокатод, вызывает **фотоэлектронную эмиссию** с его поверхности; при замыкании цепи фотоэлемента в ней протекает фототок, пропорциональный световому потоку.

В газонаполненных фотоэлементах в результате ионизации газа и возникновения несамостоятельного лавинного электрического разряда в газах фототок усиливается. Наиболее распространены фотоэлементы с сурьмяно-цезиевым и кислородно-серебряно-цезиевым фотокатодами. Материалами, из которых выполняют полупроводниковые фотоэлементы, являются Se, GaAs, CdS, Ge, Si и др.

Фотоэлементы обычно служат приемниками излучения или приемниками света (полупроводниковые фотоэлементы в этом случае нередко отождествляют с фотодиодами). Полупроводниковые фотоэлемент используют также для прямого преобразования энергии солнечного излучения в электрическую энергию — в солнечных батареях, фотоэлектрических генераторах.

### Термоэффект

**Принцип действия термопары** основан на том, что нагревание или охлаждение контактов между проводниками, отличающимися химическими свойствами, сопровождается возникновением термоэлектродвижущей силы (термоЭДС).

Термопара состоит из двух металлов, сваренных на обоих концах. Один конец помещается в месте замера температуры. Второй спай термостатируется, или измеряется его температура и погрешность вычитается расчетным способом.

Метрологической характеристикой термопары является **градуировочная таблица**, в которой указана температура «горячего» конца термопары, и термоЭДС, развиваемая термопарой при этой температуре. При этом необходимо учитывать температуру «холодного» конца термопары, и термоЭДС, развиваемую на нем необходимо вычесть из термоЭДС «горячего» конца термопары. Термопары бывают:

- ♦ открытого типа;
- ♦ закрытого типа.

Применяются термопары для измерения температуры различных объектов, а также в автоматизированных системах управления и контроля.

### Преимущества термопар:

- ♦ большой температурный диапазон измерения;
- ♦ измерение высоких температур до 1800—2200°C.

### Недостатки термопар:

- ♦ точность более 1°C труднодостижима, необходимо использовать термометры сопротивления или термисторы;
- ♦ на показания влияет температура свободных концов, на которую необходимо вносить поправку;
- ♦ возникает погрешность от изменения температуры холодного спая;
- ♦ эффект Пельтье (в момент снятия показаний, необходимо исключить протекание тока через термопару, т. к. ток, протекаемый через нее, охлаждает горячий спай и разогревает холодный).



### Пример.

*Самый простой и приемлемый вариант — это термопара с термо-ЭДС не менее 15 мВ при температуре пламени спички и длиной выводов не менее 100 мм.*

Как показали эксперименты, хорошую термопару можно изготовить из стойки токоподвода электрической лампы накаливания на 220 В мощностью 150 Вт и отрезка нихромовой проволоки такого же диаметра. Следует лишь заметить, что термопары из случайных материалов могут иметь существенный разброс удельной термо-ЭДС.

Концы отрезков заготовки будущей термопары укладывают вровень, туго скручивают между собой на 2—3 витка и на получившуюся скрутку плотно наматывают конец гибкого медного провода сечением не менее 1,5 мм<sup>2</sup>.

Второй конец провода подключают к зажиму источника тока 10—15 А напряжением 10—20 В.

Ко второму зажиму источника таким же проводом подключают обломок графитового стержня от мягкого простого карандаша.

Конец скрутки заготовки целесообразно покрыть слоем пасты из воды и буры или растолченного материала обмазки сварочного электрода. Провода должны быть возможно короче.

Включив источник и касаясь концом графитового стержня конца скрутки заготовки, оплавливают скрутку в возникающей электрической дуге так, чтобы на ней образовался маленький шарик — спай термопары.



Можно изготовить термопару и без сварки — нужно только хорошо зачистить и плотно свить концы. Однако надежность и долговечность такой термопары заметно ниже.

**Примеры химического эффекта:** всевозможные элементы питания, аккумуляторы.

Прежде чем говорить о получении и использовании электроэнергии необходимо знать, как передать ее к потребителю.

## 1.2. Проводники и их сопротивление

### Зависимость сопротивления от свойств проводника

Проведем практическую работу № 1. Для успешного проведения практических работ в домашних условиях будем пользоваться самыми доступными методами и компонентами. Кое-что придется приобрести в магазине, кое-что заимствовать от старых и неисправных электроприборов.

В данной работе нам пригодятся:

- ♦ мультиметр (тестер);
- ♦ любой элемент питания, желательно в контейнере;
- ♦ колодка контактная (любая);
- ♦ переменный резистор (100—1000 Ом);
- ♦ куски проволоки с разным удельным сопротивлением (табл. 1.1, см. далее).

Сначала выставим резистор на сопротивление около 150 Ом, измеря мультиметром в положении переключателя «200 Ом». Поставим переключатель на измерение тока в миллиамперах.

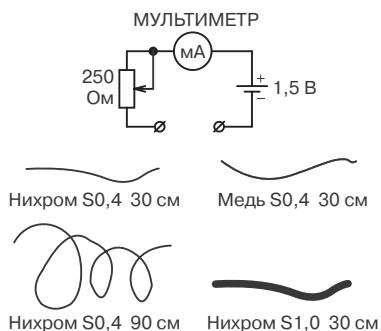


Рис. 1.3. Варианты подключения

Соберем электрическую цепь (рис. 1.3). Подключим по очереди проводники одинаковой длины и с одинаковой площадью поперечного сечения, но из разных материалов.

Запишем показания прибора:

$$I_1 = \dots \text{ А}, I_2 = \dots \text{ А}.$$

Замеряем отрезок: нихром 0,4 мм<sup>2</sup>, 30 см, получаем 14,00 мА.

Замеряем отрезок: медь 0,4 мм<sup>2</sup>, 30 см, получаем 14,33 мА.

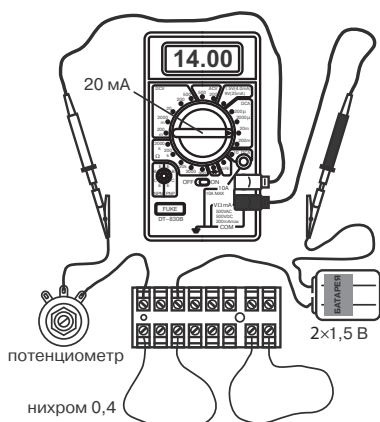


Рис. 1.4. Отрезок нихрома

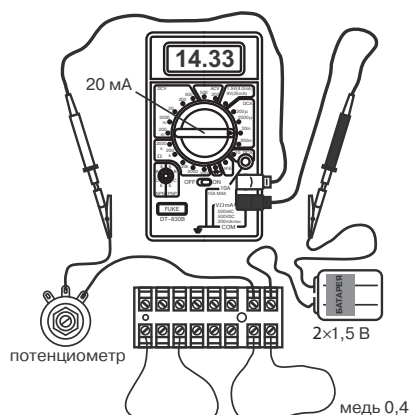


Рис. 1.5. Отрезок меди



### Вывод.

Сила тока зависит не только от напряжения, но и от свойств проводника. Это означает, что разные проводники оказывают разное противодействие току, т. е. оказывают сопротивление.

Источник энергии, включенный в замкнутую электрическую цепь, расходует энергию на преодоление сопротивления цепей.



### Определение.

Устройства, которые включают в электрическую цепь для установления определенного сопротивления этой цепи, называются **резисторами**.

Обозначение: **R**. Единица измерения: **Ом**. За единицу сопротивления принимают сопротивление такого проводника, в котором при напряжении 1 В сила тока равна 1 А:

$$1 \text{ ом} = 1 \text{ вольт} / 1 \text{ ампер}$$

На практике используются и другие единицы сопротивления:

$$1 \text{ кОм} = 1000 \text{ Ом}, 1 \text{ мОм} = 0,001 \text{ Ом}, 1 \text{ МОм} = 1000000 \text{ Ом}.$$



### Внимание.

Постоянная ошибка обучающихся! Путаница с соотношениями единиц измерения в формулах, при установке данных. Будьте внимательны сейчас и всегда!

**Правило.**

*Необходимо запомнить (очень важно), что при расчетах цепей, применяются единицы одного уровня.*

Например: если  $U = \text{нВольт}$ , то  $I = \text{нАмпер}$ ,  $R = \text{нОм}$ .

### **Взаимодействие движущихся электронов с ионами кристаллической решетки**

**Выясним:** что же является причиной, ограничивающей силу тока в проводнике? Что представляет собой электрический ток в металлах? Это направленное движение электронов.

Если бы электроны в проводнике не испытывали никаких помех в своем движении, то они, будучи приведены в упорядоченное движение, двигались бы по инерции неограниченно долго.

В действительности электроны взаимодействуют с ионами кристаллической решетки металла. При этом замедляется упорядоченное движение электронов, и сквозь поперечное сечение проводника за 1 секунду их проходит меньше.

Соответственно, уменьшается и переносимый электронами за 1 секунду заряд, т. е. уменьшается сила тока. Таким образом, каждый проводник как бы противодействует электрическому току, оказывает ему сопротивление.

**Вывод.**

*Причина сопротивления — взаимодействие движущихся электронов с ионами кристаллической решетки.*

Таким образом, сопротивление проводников зависит от свойств вещества, из которого он изготовлен.

### **Зависимость сопротивления от длины**

Проведем практическую работу № 2. Включим поочередно в цепь проволоки из одинакового материала, но разной длины (**рис. 1.6**). Запишем показания приборов. Замеряем отрезок: нихром  $0,4 \text{ мм}^2$ , 90 см, получаем 13,16 мА.



### Вывод.

*Сопротивление проводника зависит от его длины; чем длиннее проводник, тем больше сопротивление.*

### Зависимость сопротивления от площади поперечного сечения

Проведем практическую работу № 3. Включим поочередно в цепь проволоки из одинакового материала и одинаковой длины, но с разной площадью поперечного сечения (рис. 1.7). Запишем показания приборов.

Замеряем отрезок: нихром 1,0 мм<sup>2</sup>, 30 см, получаем 14,21 мА.



### Вывод.

*Сопротивление проводника зависит от площади поперечного сечения; чем больше площадь поперечного сечения, тем меньше сопротивление.*

Целью проведенных работ является наглядное представление зависимостей сопротивления проводника:

- ♦ от свойств вещества, из которого он состоит;
- ♦ от поперечного сечения проводника;
- ♦ от длины проводника;

Запишем формулу для расчета сопротивления проводника:

$$R = \rho l / S,$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление вещества (табл. 1.1).

$l$  — длина проводника, м;

$S$  — сечение проводника, мм<sup>2</sup>.

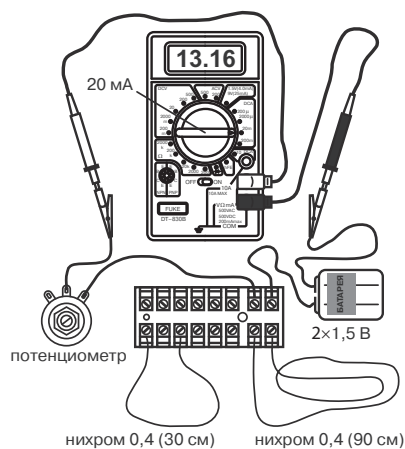


Рис. 1.6. Нихром разной длины

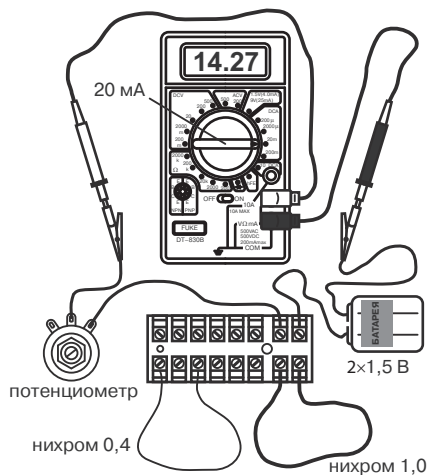


Рис. 1.7. Нихром с разным поперечным сечением

Удельное электрическое сопротивление некоторых материалов

Таблица 1.1

Материал	$\rho$ , Ом $\times$ мм <sup>2</sup> /м	Материал	$\rho$ , Ом $\times$ мм <sup>2</sup> /м
Серебро	0,016	Манганин (сплав)	0,43
Медь	0,017	Константан (сплав)	0,5
Золото	0,024	Ртуть	0,96
Алюминий	0,028	Нихром (сплав)	1,1
Вольфрам	0,055	Фехраль (сплав)	1,3
Латунь	0,071	Хромель (сплав)	1,5
Железо	0,1	Графит	13
Олово	0,12	Уголь	40
Свинец	0,21	Фарфор	1019
Платино-иридиевый сплав	0,25	Эбонит	1020
Никелин (сплав)	0,4		

Из формулы следует:

$$\rho = RS/l.$$

Единица измерения: (1 Ом $\times$ мм<sup>2</sup>)/м, или 1 Ом $\times$ м.

На практике часто площадь поперечного сечения выражают в мм<sup>2</sup>.

Поэтому удобно пользоваться единицей (1 Ом $\times$ мм<sup>2</sup>)/м

Выразим длину проводника и площадь поперечного сечения:

$$l = RS/\rho.$$

Поскольку  $R$  металлов зависит от температуры ( $R$  увеличивается при повышении температуры), то в табл. 1.1 приводятся значения при 20°C.



#### Определение.

Способность проводника пропускать электрический ток называется **проводимостью**  $g$ .

Это величина, обратная сопротивлению, единица измерения которой является **сименс**:

$$C_m = 1/\text{Ом}.$$

Удельная проводимость:  $\sigma = 1/\rho$ .

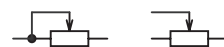
Лучшие проводники электричества: серебро, медь.

Диэлектрики: фарфор, эбонит.

## Реостаты, резисторы, потенциометры

Силу тока на практике приходится менять (уменьшать или увеличивать). Например, изменяя силу тока в динамике радиоприемника, мы регулируем громкость; в электродвигателе швейной машины — скорость вращения.

Прибор для регулирования силы тока называется **реостатом** (он же переменный резистор, **рис. 1.8**).



**Рис. 1.8.** Графическое обозначение реостата

Конструкция реостатов позволяет изменять длину проводника, по которому идет ток, изменяя при этом сопротивление в цепи.

Путем изменения сопротивления цепи можно влиять на силу тока в ней. От нее, в свою очередь, зависит действие, оказываемое током на различные устройства в цепи.

В ползунковых реостатах используют проволоку с большим удельным сопротивлением — никелиновую или нихромовую — покрытую тонким слоем окалины, т. е. витки такого реостата изолированы.

Ее наматывают на керамический цилиндр. По металлическому стержню перемещается ползунок (**рис. 1.9**, **рис. 1.10**). Реостат рассчитан на определенное сопротивление (наибольшую силу тока).

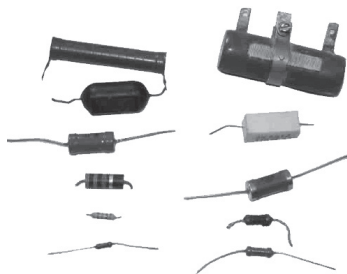


**Рис. 1.9.** Мощный потенциометр

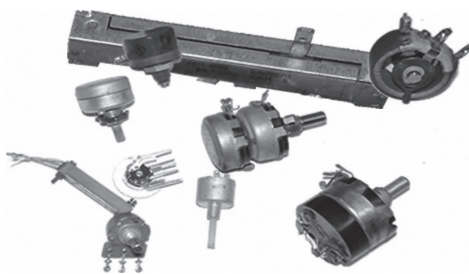


**Рис. 1.10.** Реостат

В современных радиоэлектронных устройствах используют резисторы — детали, обеспечивающие заданное (номинальное) электрическое сопротивление цепи (**рис. 1.11**).



**Рис. 1.11.** Набор постоянных сопротивлений (резисторов)



**Рис. 1.12.** Набор переменных сопротивлений (потенциометров)



Переменные сопротивления (потенциометры) могут иметь три вывода, один из которых связан с подвижным контактом, скользящим по поверхности проводящего слоя (рис. 1.12).

Сопротивление между любым крайним выводом переменного резистора и подвижным контактом зависит от положения движка.

### Небольшая задача о резисторах

Обязательным условием при изучении электротехники является решение задач. Это способствует закреплению пройденных материалов.

Дано:  $l = 100 \text{ см}$ ;  $S = 0,3 \text{ мм}$ ;  $\rho = 0,017 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ;

Решение:  $R = \frac{\rho l}{S}$ ;

$L = 100 \text{ см} = 1,0 \text{ м}$ ;

$R = \frac{0,017 \times 1,0}{0,3} = 0,057 \text{ Ом}$ ;

подсказка

НЕЗАБЫВАЙТЕ  
МЕТРЫ!

$\frac{1 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$

## 1.3. Диэлектрики и емкость

### Диэлектрики

Материалы, проводящие электрический ток, называются **проводниками**. В ряде материалов, называемых **диэлектриками**, электрический ток не возникает. У таких материалов электрические заряды молекул прочно связаны внутримолекулярными силами, и свободных электронов очень мало.



#### Примеры.

*К диэлектрикам относятся — мрамор, фарфор, слюда, стекло и др.*

В молекулах диэлектрика очень трудно отделить отрицательный заряд от положительного, но под действием сил электрического поля, внутренние молекулярные заряды упруго смещаются:

- ♦ положительные заряды — по направлению поля;
- ♦ отрицательные заряды — в обратном направлении.



### Вывод.

Таким образом, диэлектрик в электрическом поле поляризуется: на поверхности диэлектрика, обращенной к положительно заряженному проводнику, образуется отрицательный заряд  $-Q$ , а на противоположной поверхности — положительный заряд  $+Q$ .

С устранением внешнего электрического поля эти заряды исчезают. Система, состоящая из двух проводников, разделенных диэлектриком, называется **конденсатором**, а проводники — **обкладками конденсатора**.

Если два таких проводника соединить с полюсами источника электрической энергии, то между ними (и разделяющем их диэлектрике) создается **электрическое поле**. Положим, что конденсатор, состоящий из двух металлических пластин А и Б, являющихся его обкладками, подключен к полюсам источника тока.

Если напряжение этого источника  $U$ , то очевидно, что обкладки конденсатора находятся под таким же напряжением  $U$ .

Электрическое поле, возникшее в диэлектрике конденсатора, характеризуется **напряженностью**. Пусть расстояние между обкладками конденсатора  $l$  (рис. 1.13). Напряженность электрического поля представляет собой отношение напряжения на обкладках к расстоянию между ними, т. е.  $E = U/l$ .

Если напряжение на обкладках конденсатора выражено в вольтах, а расстояние между параллельно расположенными обкладками — в метрах, то напряженность электрического поля в диэлектрике конденсатора выражается в **вольтах на метр (В/м)**.

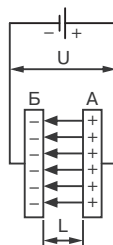


Рис. 1.13. Обкладки конденсатора



### Правило.

Чем больше напряжение на обкладках конденсатора, тем больше напряженность поля в его диэлектрике.

Обкладки конденсатора, соединенные с полюсами источника энергии, имеют положительный и отрицательный заряды. Величины зарядов, равные между собой по абсолютной величине, пропорциональны напряжению  $U$  на обкладках конденсатора.

Значит, если **величину заряда** на одной из обкладок обозначить буквой  $Q$ , то можно написать следующее равенство:

$$Q = CU.$$

В этом равенстве величина  $C$  является так называемой **емкостью конденсатора**.

Если заряд  $Q$  выражен в кулонах, а напряжение  $U$  в вольтах, то емкость выражается в фарадах.

$$1 \text{ Ф} = 1\,000\,000 \text{ мкФ} = 10^{12} \text{ пФ (пикфарад)}.$$

Емкость конденсатора зависит от обкладок, расстояния между ними и диэлектрической проницаемости.



#### **Правило.**

*Емкость конденсатора тем больше, чем больше площадь  $S$  его обкладок и диэлектрическая проницаемость среды, разделяющей их, а также, чем меньше расстояние между обкладками.*

### **Заряд и разряд конденсатора**

Подключаем конденсатор к источнику энергии — происходит заряд конденсатора до напряжения между обкладками  $U$ , равного напряжению источника  $E$ . Обкладка, соединенная с положительным полюсом источника, получит положительный заряд, вторая обкладка — равный по величине отрицательный заряд  $Q = CU$ .



#### **Примечание.**

*Для заряда конденсатора необходимо, чтобы одна из обкладок потеряла, а другая приобрела некоторое количество свободных электронов.*

Электроны движутся от одной обкладки конденсатора на другую под действием напряжения источника. *Движение этих зарядов называется **током зарядки конденсатора**.*

С повышением напряжения на конденсаторе ток заряда уменьшается и постепенно становится равным нулю. В начальный момент заряда конденсатора напряжение на нем быстро возрастает, так как ток заряда имеет большую величину зарядов и происходит быстрое накопление зарядов на обкладках конденсатора.

С повышением емкости конденсатора возрастает количество зарядов, накапливаемых на его обкладках, а с увеличением сопротивления цепи уменьшается зарядный ток. Это замедляет накопление зарядов на этих обкладках.

Если заряженный конденсатор замкнуть на какое-либо сопротивление  $R$ , то под действием напряжения на конденсаторе будет протекать **ток разряда конденсатора**.

Разряд конденсатора сопровождается переносом электронов с одной пластины (где их избыток) на другую (где их недостаток). Он продолжается до тех пор, пока потенциалы обкладок не станут одинаковыми, т. е. напряжение на конденсаторе не уменьшится до нуля.

По мере понижения напряжения разрядный ток уменьшается, и перенос зарядов с одной обкладки на другую замедляется. Продолжительность процесса разряда конденсатора зависит от сопротивления цепи и емкости конденсатора. Увеличение сопротивления и емкости увеличивает длительность разряда.



**Примечание.**

*С повышением сопротивления разрядный ток уменьшается, замедляя перенос зарядов с одной обкладки на другую; с возрастанием емкости конденсатора увеличивается заряд на обкладках.*

При неизменном напряжении ток через конденсатор не проходит, конденсатор не пропускает постоянный ток, так как между его обкладками помещен диэлектрик. При заряде конденсатор накапливает электрическую энергию, потребляя ее от источника. Накопленная энергия сохраняется некоторое время.

Чем больше емкость конденсатора и напряжение между его обкладками, тем больше энергия, накопленная им.

После заряда в конденсаторе определенное время сохраняется накопленная энергия, и напряжение на нем не меняется. При длительном



**Рис. 1.14.** Неполярные конденсаторы



**Рис. 1.15.** Электролитические конденсаторы (полярные)

хранении конденсатор полностью разряжается. Это явление называется **саморазрядом конденсатора**.

Оно объясняется тем, что любой диэлектрик не идеальный изолятор и содержит небольшое количество свободных электронов. Поэтому под действием разности потенциалов заряды переносятся с одной обкладки на другую, т. е. появляется **ток утечки**. При большом токе утечки конденсатор считается неисправным. Конденсаторы бывают полярные (рис. 1.15) и неполярные (рис. 1.14).

### Соединение конденсаторов

Соединение конденсаторов в цепи бывает **параллельным** (рис. 1.16) и **последовательным** (рис. 1.17).

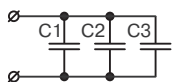


Рис. 1.16. Параллельное соединение

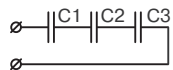


Рис. 1.17. Последовательное соединение

При **параллельном соединении** емкость их равна сумме емкостей, так как параллельное соединение увеличивает общую площадь обкладок:

$$C = C_1 + C_2 + C_3.$$

При **последовательном соединении** конденсаторов уменьшается общая емкость системы, которая будет меньше емкости любого из последовательно включенных конденсаторов, так как последовательное включение подобно увеличению толщины диэлектрика, т. е. расстоянию между обкладками конденсатора.

$$1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3.$$

## 1.4. Ваш первый шаг в электронику

### Закон Кулона

Мы уже знаем, что источник электроэнергии обладает разностью потенциалов, заряженные частицы которых, стремятся друг к другу. Существуют материалы, которые способствуют движению частиц, а также есть такие, которые ограничивают их движение.

Первые — это **проводники**, которыми является большинство металлов, вода, кислоты, щелочи и прочие. Вторые — **диэлектрики**: дерево, воздух, пластмассы и т. д.

Из хороших диэлектриков: фарфора, стекла, текстолита, резины и т. д. изготавливают **изоляторы** (табл. 1.2).

Электрические свойства диэлектриков

Таблица 1.2

Изолирующие материалы (диэлектрики)	Диэлектрическая проницаемость $\epsilon$	Электрическая прочность, В/см
Воздух	1	30000
Мрамор	8,3	20000—30000
Парафин	2,0—2,2	150000—500000
Резина	3,5	100000—150000
Слюда	6,0—7,5	1200000—2000000
Стекло	5,5—10,0	100000—400000
Фарфор	3,0—7,5	60000—100000
Эбонит	2,0—3,5	80000—100000
Кабельная бумага	2,3—3,5	60000—90000
Трансформаторное масло	2,0—2,5	50000—180000

В качестве проводника электроэнергии используется медь, алюминий, бронза, латунь, серебро, золото и их сплавы.

Тем не менее, нужно отметить, что деление тел на проводники и диэлектрики весьма условно. Все вещества в большей или меньшей степени проводят электричество.

Для продолжительного существования электрического тока в проводнике необходимо поддерживать электрическое поле. Для этих целей используются **источники электротока**.



#### Определение.

**Электрическим полем** называется материальная среда, в которой обнаруживается силовое действие на зараженные частицы или тела.

Условно электрическое поле изображают в виде электрических силовых линий, направление которых совпадает с направлением сил, действующих в нем. В зависимости от интенсивности поля силовые линии электрического поля изображают расположенными гуще или реже (рис. 1.18). Среду принято характеризовать особой величиной, называемой **диэлектрической проницаемостью** ( $\epsilon$ ).

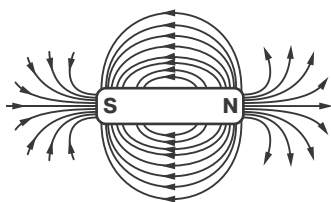


Рис. 1.18. Электрическое поле

Сила взаимодействия двух точечных электрических зарядов определяется **законом Кулона** и направлена по прямой, соединяющей эти заряды (одноименные заряды отталкиваются, разноименные притягиваются).



#### **Закон Кулона гласит:**

*Сила взаимодействия двух точечных электрических зарядов прямо пропорциональна произведению количества электричества в этих зарядах, обратно пропорциональна расстоянию между ними и зависит от среды, в которой находятся заряды.*

Электрическое поле оказывает силовое действие на внесенное в него электрически заряженное тело. Следовательно, электрическое поле может совершить работу, т. е. оно обладает **энергией**.

Каждая точка электрического поля может быть характеризована напряженностью поля  $E$  или потенциалом  $\Phi$ .

**Напряженность электрического поля  $E$  (В/м)** определяется отношением силы  $F$ , с которой поле действует на точечный заряд, помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда, т. е.  $E = F/Q$ .



#### **Определение.**

***Точечным зарядом** называется заряженное тело, линейные размеры которого ничтожно малы и заряд, которого в результате этого практически не искажает поля.*

При  $Q$ , равном единице,  $E$  численно равно 1, следовательно, напряженность электрического поля численно равно силе поля, действующей на единичный заряд.

Для преодоления сил электрического поля при внесении в него электрического заряда необходимо затрачивать определенную работу.

### **Электрический ток и внутреннее сопротивление**



#### **Определение.**

***Запас энергии (потенциальная энергия) единицы количества электричества, находящейся в данной точке электрического поля, называется потенциалом.***

Единицей измерения потенциала является вольт (В) или (V). Потенциал Земли принято считать равным нулю, и если проводник соединен с землей, то его потенциал также равен нулю.

Самый простой случай возникновения электрического тока, это когда один конец провода соединен с наэлектризованным телом, а другой — с землей. Если мы возьмем отрезок проводника (рис. 1.20) и соединим им две полярности источника, то мы получаем движение заряженных частиц по проводнику (рис. 1.21) от (+) к (–) (рис. 1.19). Это движение, есть **электрический ток**.

**Электрический ток** определяет количество электричества, проходящего через поперечное сечение проводника в единицу времени. Если в проводнике протекает ток 1 ампер (рис. 1.21), то через поперечное сечение этого проводника в течение 1 секунды протекает 1 кулон электричества.

Любое тело обладает свойством сопротивляться движению заряженных частиц (электро-току). Это свойство зависит от вещества, из которого состоит тело, и называется **сопротивлением**.

У проводников оно мало, у диэлектриков — велико. Источник электроэнергии тоже имеет свое сопротивление, называется оно **внутренним сопротивлением источника**.

Это свойство проводников широко используется в электрических цепях. Рассмотрим простую схему работы источника электротока со своим внутренним сопротивлением.

При разомкнутой цепи источника движение отсутствует (рис. 1.22). При замыкании полюсов течет ток по замкнутой цепи (рис. 1.23) по проводнику, у которого имеется свое сопротивление и по собственному внутреннему сопротивлению.

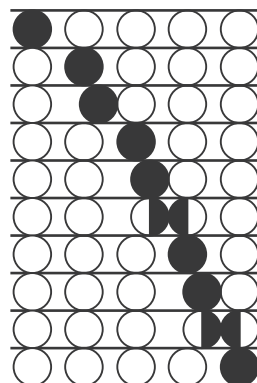


Рис. 1.19. Образное представление движения тока

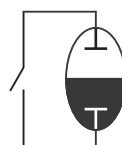


Рис. 1.20. Ток отсутствует

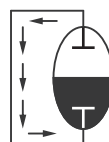


Рис. 1.21. Ток протекает

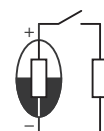


Рис. 1.22. Цепь разомкнута

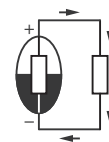


Рис. 1.23. Цепь замкнута



Источник имеет определенное количество электроэнергии. Какой будет величина тока, протекающего по цепи?

Она будет зависеть от разницы потенциалов (мы помним: чем больше разница, тем больше притяжение) и от сопротивления проводника и внутреннего сопротивления источника.



**Примечание.**

*Как правило, сопротивление источника очень мало, и при изучении им можно пренебречь.*

Зависимость такая: электрический ток будет равен тому, что мы получим, когда поделим разность потенциалов участка (величина напряжения) на сопротивляемость этого участка (сопротивление).

Обозначаем:  $I$  — электрический ток;  $U$  — напряжение;  $R$  — сопротивление.

$I = U/R$  или  $U = IR$  — это есть знаменитый закон Ома.

Взаимосвязь тока, напряжения и сопротивления можно назвать основным законом электротехники, он применим во всем, что связано с электричеством.

На этом законе построено и работает все — электрические сети, все возможное электрооборудование, электрические механизмы, электроника, радиотехника и т. д.

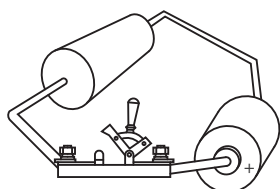
Знание и умение объяснить и применить закон Ома — это первый большой шаг в изучении электричества, до конца непознанной науки.

Действие электрического тока в примерах рисунков: рис. 1.24 — рис. 1.29.

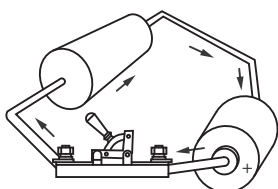
Работа тока только через проводник приводит к короткому замыканию так, как сопротивление проводника очень мало (рис. 1.30, рис. 1.31).

В данном случае разрушиться может все, что находится в схеме (источник, проводник, выключатель), разрушение током будет продолжаться до разрыва в самом слабом месте цепи. У нас условно показаны разрывы в нескольких местах (рис. 1.32).

Это пример с источником большой мощности, обыкновенная батарейка просто потеряет свой заряд. Если уменьшать сопротивление в цепи, то сопротивление всей цепи уменьшится, а ток в цепи увеличится.



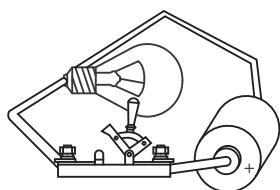
**Рис. 1.24.** Электрическая цепь с сопротивлением разомкнута



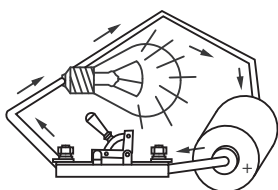
**Рис. 1.25.** Электрическая цепь с сопротивлением замкнута



**Рис. 1.26.** Графическое изображение схемы с сопротивлением



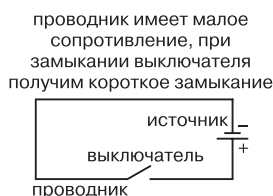
**Рис. 1.27.** Электрическая цепь с электролампой разомкнута



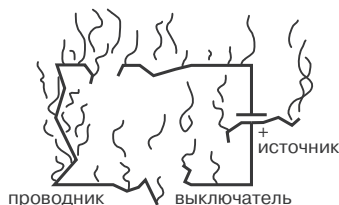
**Рис. 1.28.** Электрическая цепь с электролампой замкнута



**Рис. 1.29.** Графическое изображение схемы с электролампой



**Рис. 1.30.** Схема короткого замыкания (К.З.)



**Рис. 1.31.** Образное представление разрушительного действия тока К.З.

С увеличением тока падение напряжения внутри источника энергии возрастает, так как внутреннее сопротивление источника остается неизменным.

Следовательно, с уменьшением сопротивления внешней цепи напряжение на источнике тоже уменьшается.

При соединении источника энергии с проводником, сопротивление которого равно нулю, ток в цепи  $I = E/R_0$ . Это наибольший ток, который может быть получен в цепи источника.

$I$  — сила тока;  $E$  — напряжение;  $R_0$  — внутреннее сопротивление источника.

Для источников энергии с малым внутренним сопротивлением, например для электрических генераторов и кислотных аккумулято-

ров, короткое замыкание опасно, оно может вывести из строя эти источники.

Короткое замыкание может возникнуть, из-за нарушения изоляции проводов, соединяющих приемник с источником энергии.

Металлические линейные провода при взаимном соприкосновении образуют малое сопротивление, которое по сравнению с сопротивлением приемника может быть принято равным нулю.

Для защиты аппаратуры от токов короткого замыкания применяют предохранители.

## 1.5. Вопросы для тестирования

### **Вопрос №1.**

Для изготовления спиралей электрических плиток используют проводники с большим удельным сопротивлением. Какой проводник пригоден для этого?

а) Медный; б) алюминиевый; в) никелиновый; г) стальной.

### **Вопрос № 2.**

Из каких веществ изготавливают проводники, применяемые на практике?

а) Эбонит; б) медь; в) константан; г) нихром.

### **Вопрос №3.**

Удельное сопротивление константана  $0,5 \text{ Ом} \times \text{мм}^2/\text{м}$ . Это значит, что константановый проводник длиной ...

а) ... 0,5 м и площадью поперечного сечения 1 мм имеет сопротивление 1 Ом; б) ... 1 м и площадью поперечного сечения 0,5 мм имеет сопротивление 1 Ом; в) ... 2 м и площадью поперечного сечения 1 мм имеет сопротивление 0,5 Ом; г) ... 1,5 м и площадью поперечного сечения 0,5 мм имеет сопротивление 0,5 Ом.

### **Вопрос №4.**

Длина одного провода 20 см, другого — 1,6 м. Площадь сечения и материал проводов одинаковы. У какого провода сопротивление больше и во сколько раз?

а) Второго; в 8 раз; б) второго; в 4 раза; в) первого; в 8 раз; г) первого; в 10 раз.

**Вопрос №5.**

Проволоки имеют равные размеры. Какая из них имеет наименьшее сопротивление?

а) Медная; б) железная; в) никелиновая; г) стальная.

**Вопрос №6.**

Какие вещества используют в качестве изоляторов?

а) Эбонит; б) медь; в) серебро; г) золото.

**Вопрос №7.**

Удельное сопротивление никелина  $0,4 \text{ Ом} \times \text{мм}^2/\text{м}$ . Это значит, что никелиновый проводник длиной ...

а) ...  $0,4 \text{ м}$  и площадью поперечного сечения  $1 \text{ мм}^2$  имеет сопротивление  $1 \text{ Ом}$ ; б) ...  $2 \text{ м}$  и площадью поперечного сечения  $0,4 \text{ мм}^2$  имеет сопротивление  $1 \text{ Ом}$ ; в) ...  $1 \text{ м}$  и площадью поперечного сечения  $1 \text{ мм}^2$  имеет сопротивление  $0,4 \text{ Ом}$ ; г) ...  $1 \text{ м}$  и площадью поперечного сечения  $0,4 \text{ мм}^2$  имеет сопротивление  $0,4 \text{ Ом}$ .

**Вопрос №8.**

Проволоку разрезали пополам и сложили вдвое. Изменится ли ее сопротивление?

а) Не изменится; б) уменьшится в 4 раза; в) увеличится в 4 раза; г) уменьшится в 2 раза.

**Вопрос №9.**

Какого сечения нужно взять константановую проволоку длиной  $8 \text{ м}$ , чтобы она имела сопротивление  $5 \text{ Ом}$ ? Удельное сопротивление константана  $0,5 \text{ Ом} \times \text{мм}^2/\text{м}$ .

а)  $1 \text{ мм}^2$ ; б)  $0,5 \text{ мм}^2$ ; в)  $0,8 \text{ мм}^2$ ; г)  $0,25 \text{ мм}^2$ .

**Вопрос №10.**

Какой длины нужно взять нихромовый проводник площадью поперечного сечения  $0,2 \text{ мм}^2$  для изготовления спирали нагревательного элемента сопротивлением  $22 \text{ Ом}$ ? Удельное сопротивление нихрома  $1,1 \text{ Ом} \times \text{мм}^2/\text{м}$ .

а)  $1 \text{ м}$ ; б)  $2 \text{ м}$ ; в)  $3 \text{ м}$ ; г)  $4 \text{ м}$ .

**Вопрос №11.**

Электрическим током называется...

- а) ... тепловое движение молекул вещества; б) ... хаотичное движение электронов; в) ... упорядоченное движение заряженных частиц; г) ... беспорядочное движение ионов.

**Вопрос №12.**

За направление тока принимают...

- а) ... движение нейтронов; б) ... движение электронов; в) ... движение положительно заряженных частиц; г) ... движение элементарных частиц.

**Вопрос №13. Какая формула выражает закон Ома для участка цепи?**

- а)  $I = q/t$ ; б)  $A = IUt$ ; в)  $P = IU$ ; г)  $I = U/R$ .

**Вопрос №14.**

Сопротивление проводника зависит от...

- а) ... силы тока в проводнике; б) ... от материала, из которого изготовлен проводник, от его длины и площади поперечного сечения; в) ... только от его длины; г) ... только от площади поперечного сечения.

**Вопрос №15.**

Сопротивление двух последовательно соединенных проводников равно...

- а) ... сопротивлению одного из них; б) ... сумме их сопротивлений; в) ... разности их сопротивлений; г) ... произведению сопротивлений.

**Вопрос №16.**

Напряжение на участке можно измерить...

- а) ... вольтметром; б) ... амперметром; в) ... омметром; г) ... реометром.

**Вопрос №17.**

Силу тока на участке цепи измеряют...

- а) ... омметром; б) ... манометром; в) ... вольтметром; г) ... амперметром.

**Вопрос №18.**

Каково напряжение на участке цепи постоянного тока с электрическим сопротивлением 2 Ом и при силе тока 4 А?

а) 2 В; б) 8 В; в) 1 В; г) 4 В.

**Вопрос №19.**

Какова сила тока в цепи, если на участке с электрическим сопротивлением 4 Ом напряжение равно 2 В?

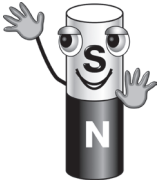
а) 2 А; б) 0,5 А; в) 1 А; г) 0,25 А.

**Вопрос №20.**

Какая из формул выражает закон Ома для полной цепи?

а)  $Q = IUt$ ; б)  $I = U/R$ ; в)  $P = IU$ ; г)  $I = E/(R + r)$ .

## ПОЗНАКОМИМСЯ С ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ



*Сделав ВТОРОЙ шаг, вы познакомитесь с постоянным током. Рассмотрите зависимости сопротивлений, последовательное, параллельное и смешанное соединение, зависимости тока, работу и мощность. Изучите расчет цепей и их режимы. Познакомитесь с химическими источниками. И в завершении — ответите на вопросы для самоотестирования.*

### 2.1. Зависимости сопротивлений

#### Зависимость сопротивления от положения движка

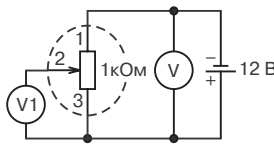
Мы рассматривали зависимость сопротивления от размеров и свойств проводника. Теперь проверим, как же влияют друг на друга составляющие закона Ома.

Переменные резисторы (потенциометры) могут иметь три вывода (рис. 2.1), один из которых связан с подвижным контактом, скользящим по поверхности проводящего слоя. Сопротивление между любым крайним выводом переменного резистора и подвижным контактом зависит от положения движка.

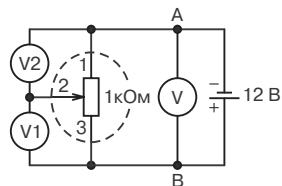
Выяснили, что при любом положении движка резистора соблюдается равенство: напряжение участка 1-3 равно сумме напряжений участка 1-2 и участка 2-3 (рис. 2.3 — рис. 2.6).



**Рис. 2.1.** Переменный резистор с подвижным контактом (потенциометр)



**Рис. 2.2.** Регулировка напряжения потенциометром



**Рис. 2.3.** Напряжения на участках потенциометра

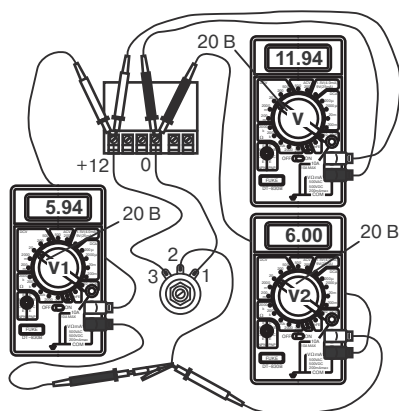


Рис. 2.4. Движок потенциометра на середине

Выяснили, что чем больше сопротивление участка, тем больше напряжение на нем. Следовательно, потенциометром можно регулировать напряжение (рис. 2.2).

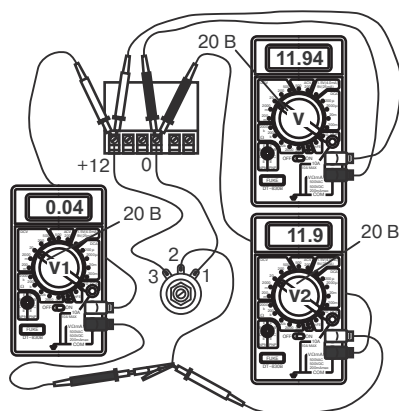


Рис. 2.5. Движок в направлении 3

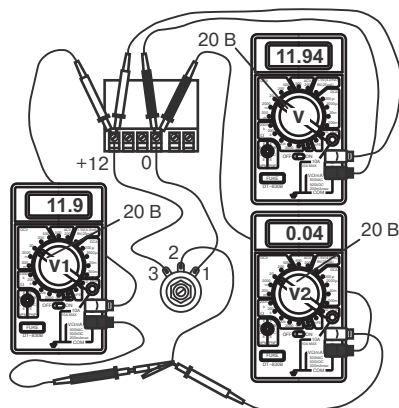


Рис. 2.6. Движок в направлении 1

### Зависимость сопротивления проводника от температуры

Применяя закон Ома, установим зависимость сопротивления проводника от температуры. В данной работе можно лишь убедиться, что с увеличением температуры сопротивление проводника увеличивается.

Для выполнения работы понадобится миллиамперметр и реостат с большим сопротивлением (рис. 2.7).

1. При малом свечении лампы (рис. 2.8):

$$I = 0,10 \text{ A} = 100 \text{ mA}; U = 1,15 \text{ V};$$

Найдем сопротивление:

$$R = 1,15 / 0,1 = 11,5 \text{ Ом};$$

2. В полнакала (рис. 2.9):

$$I = 0,19 \text{ A} = 190 \text{ mA}; U = 3,16 \text{ V};$$

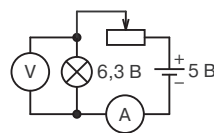


Рис. 2.7. Схема определения зависимости сопротивления проводника от температуры



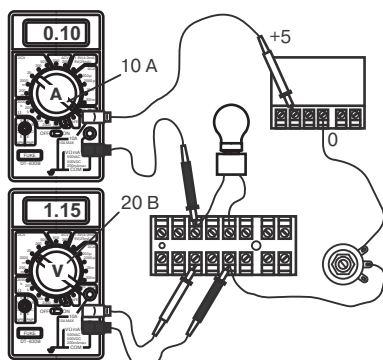


Рис. 2.8. Малое свечение лампы

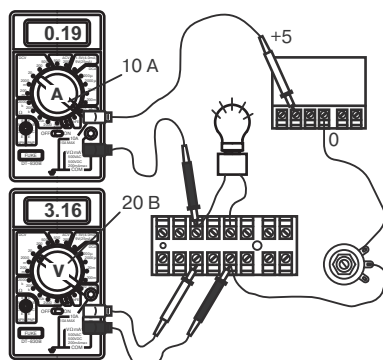


Рис. 2.9. Свечение лампы в полнакала

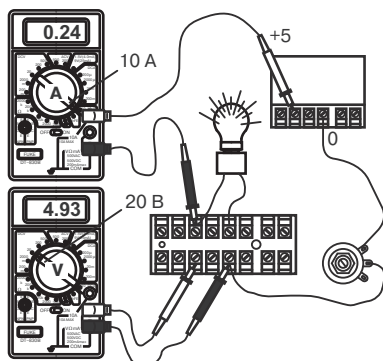


Рис. 2.10. Яркое свечение лампы

Найдем сопротивление:

$$R = 3,16 / 0,19 = 16,6 \text{ Ом};$$

3. При горячем состоянии, ярком свечении (рис. 2.10):

$$I = 0,24 \text{ A} = 240 \text{ mA}; U = 4,93 \text{ В};$$

Найдем сопротивление:

$$R = 4,93 / 0,24 = 20,5 \text{ Ом};$$

Мы уже знаем, что при изменении напряжения в цепи изменяется ток, а сопротивление — нет. В этом случае при изменении напряжения меняется ток, который влияет на состояние нити накала. Изменяется яркость свечения и температура.

Температура, в свою очередь, влияет на сопротивление, что мы и видим при расчетах. Составим таблицу (табл. 2.1):

Результаты измерений

Таблица 2.1

Физическая величина	Малый накал	Полнакала	Большой накал	Ед. измерения
Ток	100	190	240	мА
Сопротивление	11,5	16,6	20,5	Ом

На основании данных табл. 2.1 построим график (рис. 2.11).

Проделанный опыт показывает зависимость сопротивления от температуры.

**Примечание.**

*Опыт основан на приближенных результатах и расчетах для наглядного показа этой зависимости, без определения температуры нити накала.*

Узнать температуру нити накала можно по формуле зависимости  $R$  от  $t$ :

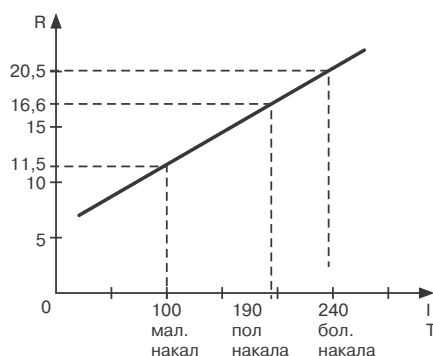
$$R_t = R_0 (1 + \alpha t),$$

где  $R_t$  — сопротивление при температуре  $t$ ;

$R_0$  — сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ ;

$\alpha$  — температурный коэффициент сопротивления (для вольфрама:  $\alpha = 0,0046 \text{ град}^{-1}$ ).

При  $R_0 = 2,2 \text{ Ом}$ , в нашем случае, в точке малого накала температура равна  $2021^\circ\text{C}$ .



**Рис. 2.11.** График зависимости сопротивления проводника от температуры

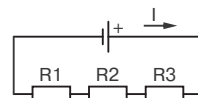
## 2.2. Последовательное соединение

### Последовательное соединение резисторов

Электрическая цепь может содержать несколько приемников (нагрузок) энергии, имеющих различные сопротивления. Предположим, что внешняя цепь аккумулятора состоит из трех нагрузок с сопротивлениями  $R_1$ ;  $R_2$ ;  $R_3$ .

**Определение.**

*Такое соединение нагрузок, при котором каждая из них поочередно включена в одну замкнутую электрическую цепь, называется **последовательным** (рис. 2.12).*



**Рис. 2.12.** Схема последовательного соединения

Ток при этом во всех нагрузках одинаков, а сопротивление внешней цепи (сопротивление аккумулятора не считается) равно сумме их сопротивлений.

Зная закон Ома, представляем:

$$I = E / (R_0 + R_1 + R_2 + R_3);$$

где  $R_0$  — внутреннее сопротивление источника.

Напряжение на последовательно соединенных нагрузках равно произведению силы тока на сопротивление нагрузки:

$$U_1 = IR_1; U_2 = IR_2; U_3 = IR_3.$$

Значит, сумма напряжений на нагрузках равна напряжению на источнике. По всей цепи протекает одинаковый ток, значит, напряжения пропорциональны их сопротивлениям:

$$U_1:U_2:U_3 = R_1:R_2:R_3.$$

При постоянном напряжении ток зависит от сопротивления цепи. Поэтому изменение сопротивления одной нагрузки ведет к изменению общего сопротивления всей цепи, тока и напряжения на всех нагрузках. Слегка запутанные представления лабораторных работ, великолепно влияют на усвоение материала и на умение сборки и чтения электрических схем.



**Примечание.**

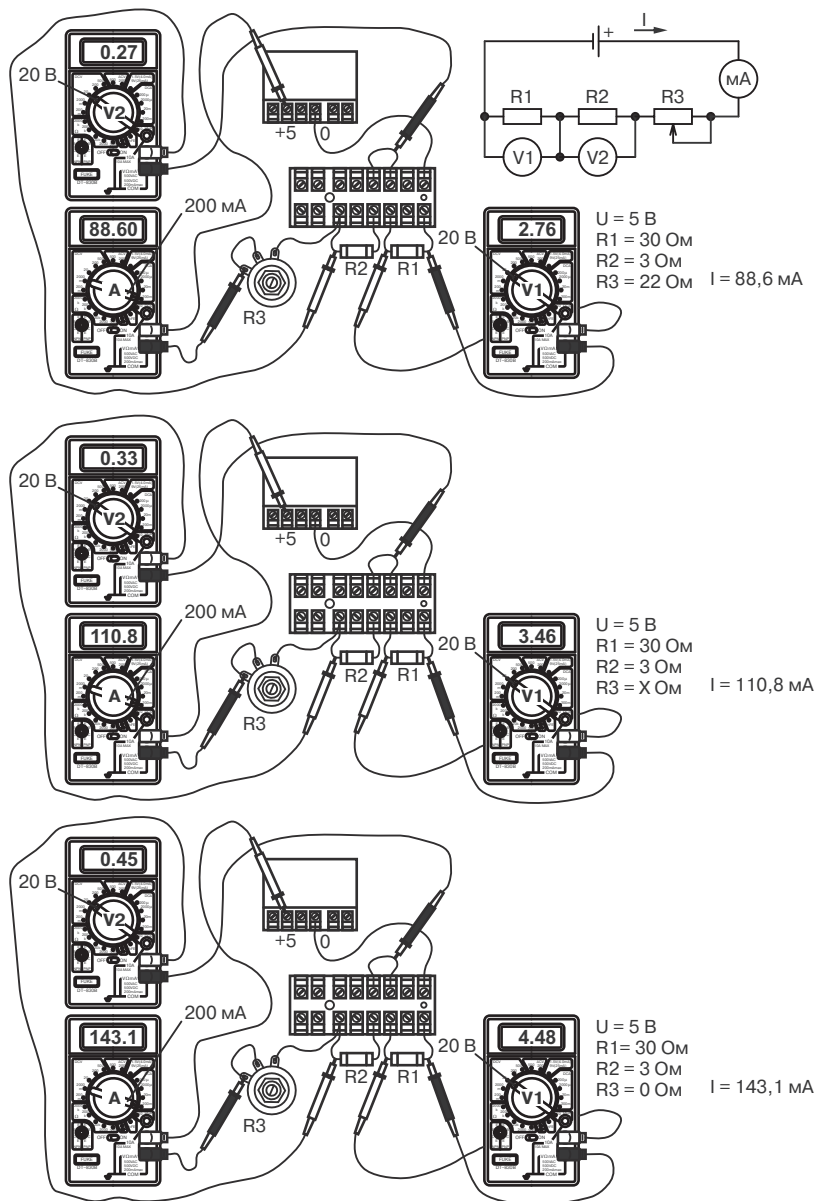
*В практических работах можно использовать любые, имеющиеся в наличии, компоненты, близкие по значениям и параметрам. Соответственно, показания и результаты будут иными, но суть проделанной работы усвоится лучше.*

Рассмотрим работу цепи в трех положениях потенциометра  $R_3$ :

1.  $R_{31} = 22 \text{ Ом}$  (рис. 2.13, б);
2.  $R_{32} =$  (среднее положение регулятора, рис. 2.13, в);
3.  $R_{33} = 0$  (рис. 2.13, г).

Схема собрана с помощью клеммной колодки, соединения между резисторами посредством перемычек черного цвета.

1. На рис. 2.13, б видим показания при  $R_3 = 22 \text{ Ом}$ ;  $I = 88,6 \text{ мА}$ .
2. На рис. 2.13, в установили положение ползунка в произвольное положение. Не лишним будет рассчитать сопротивление потенциометра в этом положении.



**Рис. 2.13.** Измерения в цепи с последовательно соединенными резисторами:

а — исходное состояние элементов схемы;

б — состояние схемы при  $R_{31} = 22 \text{ Ом}$ ;

в — состояние схемы при положении ползунка  $R_{31}$  в произвольном положении;

г —  $R_3 = 0 \text{ Ом}$

**Примечание.**

*Учитывайте, что показания приборов не точны, и мы не берем во внимание сопротивления проводов, так что все расчеты приближены, и соответственно, результаты мы получим приближенные, исключительно для общего понимания и наглядности.*

Смотрим **рис. 2.13, в**:  $R_3 = X$ ;  $I = 110,8 \text{ мА}$ ;  $U_3 = Y$ .

Находим падение напряжения на  $R_3$ :

$$U_3 = 5 - (U_1 + U_2) = 5 - (3,46 + 0,33) = 1,21 \text{ В};$$

$$R_3 = U_3 / I = 1,21 / 0,1108 \text{ А} = 10,9 \text{ Ом}; I = 110,8 \text{ мА}$$

3. На **рис. 2.13, з** установили потенциометр — сопротивление до 0, в цепи осталось два сопротивления и их падения напряжения в сумме должны быть равны напряжению источника:

$$U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 = 4,48 + 0,45 = 4,93 \text{ В}; I = 143,1 \text{ мА}.$$

Хорошо видны зависимости тока и падений напряжения от величины сопротивления в цепи. Последовательное соединение добавочных резисторов используется на практике для понижения напряжения.

**Внимание.**

**ЕСЛИ НЕПОЯТНО — ДАЛЬШЕ НИ ШАГУ!  
ПОВТОРИТЕ ИЛИ ОТЛОЖИТЕ ДО ЛУЧШЕГО НАСТРОЕНИЯ!**

Все понятно? Отлично! Идем дальше.

## 2.3. Параллельное и смешанное соединение

### О чем нам говорит первый закон Кирхгофа

В цепях, состоящих из последовательно соединенных источника и приемника энергии, соотношения между током, ЭДС и сопротивлением всей цепи или, между напряжением и сопротивлением на каком-либо участке цепи определяется **законом Ома**. На практике в цепях токи от какой-либо точки идут по разным путям.

**Определение.**

Точки, где сходятся несколько проводников, называются **узлами**, а участки цепи, соединяющие два соседних узла, **ветвями**.

В замкнутой электрической цепи ни в одной ее точке не могут скапливаться электрические заряды так, как это вызвало бы изменение потенциалов точек цепи.

**Вывод.**

Поэтому электрические заряды, притекающие к какому-либо узлу в единицу времени, равны зарядам, утекающим от этого узла за ту же единицу.

В узле А цепь разветвляется на четыре ветви, которые сходятся в узел В. Обозначим токи в неразветвленной части цепи —  $I$ , а в ветвях соответственно  $I_1, I_2, I_3, I_4$  (рис. 2.14).

У этих токов в такой цепи будет соотношение:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4.$$

**Правило.**

Сумма токов, подходящих к узловой точке электрической цепи, равна сумме токов, уходящих от этого узла.

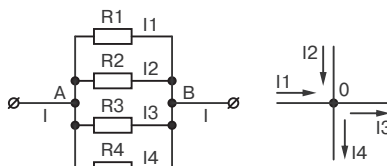


Рис. 2.14. Разветвленная цепь

**Примечание.**

Ничто не исчезает бесследно и не появляется из ничего.

При параллельном соединении резисторов ток проходит по четырем направлениям, что уменьшает общее сопротивление или увеличивает общую проводимость цепи, которая равна сумме проводимостей ветвей.

Обозначим силу тока в неразветвленной ветви буквой  $I$ . Силу тока в отдельных ветвях соответственно  $I_1, I_2, I_3$  и  $I_4$ . Напряжение между точками А и В —  $U$ . Общее сопротивление между этими точками —  $R$ .

По закону Ома напишем:

$$I = U/R; I_1 = U/R_1; I_2 = U/R_2; I_3 = U/R_3; I_4 = U/R_4;$$

Согласно первому закону Кирхгофа:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \text{ или } U/R = U/R_1 + U/R_2 + U/R_3 + U/R_4.$$

Сократив обе части полученного выражения на  $U$  получим:

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + 1/R_4.$$

Что и требовалось доказать. Соотношение верно для любого числа параллельно соединенных резисторов.

В случае если в цепи содержится два параллельно соединенных резистора  $R_1$  и  $R_2$ , то можно написать равенство:

$$1/R = 1/R_1 + 1/R_2.$$

Из этого равенства найдем сопротивление  $R$ , которым можно заменить два параллельно соединенных резистора:

$$R = R_1 R_2 / (R_1 + R_2).$$

Полученное выражение имеет большое практическое применение.

### Параллельное соединение резисторов

Если параллельно соединены  $n$  одинаковых резисторов  $R$ , то общее сопротивление такой цепи будет в  $n$  раз меньше сопротивления одного резистора,  $R_{\text{общ}} = R/n$ .

Напишем следующее:  $I_1 R_1 = U$ ;  $I_2 R_2 = U$ ;  $I_3 R_3 = U$ ;  $I_4 R_4 = U$ .

Все части равны, значит:  $I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3 = I_4 R_4$ .

Получим:  $I_1/I_2 = R_2/R_1$ ;  $I_2/I_3 = R_3/R_2$  и т. д.



#### Вывод.

*Эти соотношения показывают, что в цепях с параллельно включенными сопротивлениями токи распределяются обратно пропорционально этим сопротивлениям. Значит, чем больше величина параллельно включенного сопротивления, тем меньше ток в этом сопротивлении, и наоборот.*

Если напряжение между узлами не изменяется, то токи в резисторах, включенных между этими узлами, не зависят друг от друга. Выключение одного или нескольких резисторов из цепи не отражается на работе остальных, оставшихся включенными. Поэтому электролампы, электродвигатели и другие включают параллельно.



#### Вывод.

*Чем больше величина включенного, параллельно, сопротивления, тем меньше ток в этом сопротивлении, и наоборот.*

Рассмотрим работу цепи (рис. 2.17) в двух положениях потенциометра:

1.  $R_3 = 22 \text{ Ом}$  (рис. 2.15); при этом  $I_1 = 0,18 \text{ A}$ ;  $I_3 = 0,18 \text{ A}$ ;  $I_2 = 0,1 \text{ A}$ ;

2.  $R_3 = 0$  (рис. 2.16); при этом  $I_1 = 0,25 \text{ A}$ ;  $I_3 = 0,25 \text{ A}$ ;  $I_2 = 0,16 \text{ A}$ .

Ток, входящий в схему, и выходящий — равны.

Ток, протекающий по одной параллельной ветви, меньше чем входящий или выходящий, что говорит о протекающем токе во второй параллельной ветви (при первом положении  $R_3$ ):

$$I_4 = I_1 - I_2 = 0,18 - 0,1 = 0,08 \text{ A}.$$

При уменьшении сопротивления в одной из параллельных ветвей, ток в этой ветви возрастает:  $0,16 > 0,1$ .

При втором положении  $R_3$ :

$$I_4 = 0,25 - 0,16 = 0,09 \text{ A}.$$

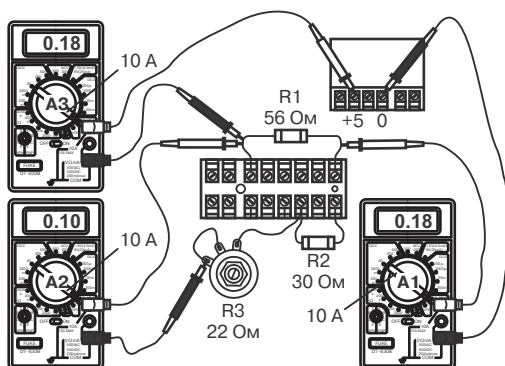


Рис. 2.15. Положение потенциометра  $R_3 = 22 \text{ Ом}$

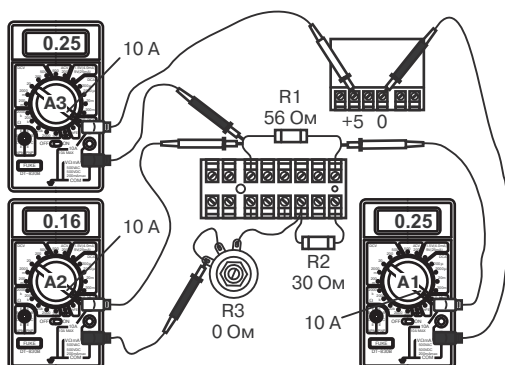


Рис. 2.16. Положение потенциометра  $R_3 = 0 \text{ Ом}$

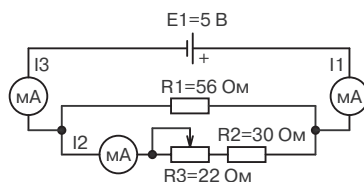


Рис. 2.17. Схема параллельного соединения резисторов

## Смешанное соединение сопротивлений



### Определение.

Если резисторы, соединенные параллельно между собой, включены последовательно с другими резисторами, то такое соединение их называется **смешанным** (рис. 2.18).



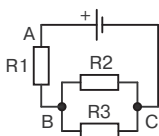


Рис. 2.18. Смешанное соединение резисторов

Для определения сопротивления нескольких резисторов, соединенных смешанно, сначала находят сопротивление параллельно или последовательно соединенных резисторов, а затем заменяют их одним резистором с сопротивлением, равным найденному.

Например, для определения сопротивления между точками А и С сначала находят сопротивление между точками В и С:

$$R = R_2 R_3 / (R_2 + R_3).$$

Потом складывают полученное значение сопротивления с сопротивлением  $R_1$ :

$$R = (R_2 R_3 / (R_2 + R_3)) + R_1$$

### Нелинейные сопротивления



#### Определение.

Сопротивление, которое не зависит от проходящего по ней тока, называется **линейным**. Если сопротивление зависит от проходящего по ней тока, то называется **нелинейным**.

Устройство нелинейного элемента предусматривает изменение своего сопротивления, в зависимости от силы проходящего по нему тока.

У **линейного сопротивления** вольтамперная характеристика представляет собой прямую, так как сопротивление постоянно.

Согласно закону Ома между током и напряжением существует прямо пропорциональная зависимость.

Для **нелинейного элемента** вольтамперная характеристика не прямолинейна, а его сопротивление уменьшается с ростом тока (например, в электронных приборах: электронных лампах, полупроводниковых диодах и стабилитронах). Или сопротивление элемента растет с увеличением тока (например, нагревательные приборы, лампа накаливания).

При последовательном соединении двух нелинейных сопротивлений ток в цепи является общим для обоих сопротивлений, а приложенное напряжение в любой момент равно сумме напряжений на первом и втором нелинейном сопротивлении.

При параллельном соединении нелинейных сопротивлений ток в неразветвленной цепи в любой момент равен сумме токов в этих сопротивлениях, а напряжение на зажимах цепи является общим для обоих сопротивлений.

Расчет при смешанном соединении сопротивлений производится так же, как линейных, с заменой результатов на одно общее и т. д.

## 2.4. Зависимости тока

### Зависимость силы тока от напряжения

Подключаем потенциометр к клеммам 5 вольт источника тока нашего БП. Изменяем напряжение потенциометром. Собираем электрическую цепь по схеме, проводим измерения, меняя напряжение и сопротивление цепи.

**Случай 1.**  $R_3 = 22 \text{ Ом}$ .

1. Подвижной контакт в верхнем положении резистора (рис. 2.19). Падение напряжения на  $R_1$ :  $U = 5 \text{ В}$ .

По приборам:  $U_{r_3} = 1,39 \text{ В}$ .

$I = 61,8 \text{ мА} = 0,0618 \text{ А}$  (рис. 2.20).

Проверим полученные данные:

$R = 56 \text{ Ом} + 22 \text{ Ом} = 78 \text{ Ом}$ ;  $U = IR$ ;

$U = 0,0618 \text{ А} \times 78 \text{ Ом} = 4,82 \text{ В}$ ;

Без учета сопротивлений приборов и проводов.

2. Подвижной контакт — в произвольном положении, подальше от предыдущего, но чтобы приборы не показывали ноль.

Падение напряжения на  $R_1$ :  $U < 5 \text{ В}$ ;

$U_{r_3} = 0,06 \text{ В}$ ;

$I = 2 \text{ мА} = 0,002 \text{ А}$  (рис. 2.21);

Проверим:

$U_{r_2} = 56 \text{ Ом} \times 0,002 \text{ А} = 0,1 \text{ В}$ ;

$U = 0,1 + 0,06 = 0,16 \text{ В}$ ;

3. Подвижной контакт в положении ближе к верхнему (по схеме).

Падение напряжения на  $R_1$ :  $0,16 < U < 5 \text{ В}$ ;

$U_{r_3} = 1,2 \text{ В}$ ;

$I = 54 \text{ мА} = 0,054 \text{ А}$  (рис. 2.22).

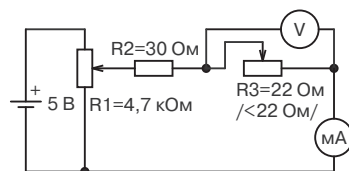


Рис. 2.19. Схема определения зависимости силы тока от напряжения

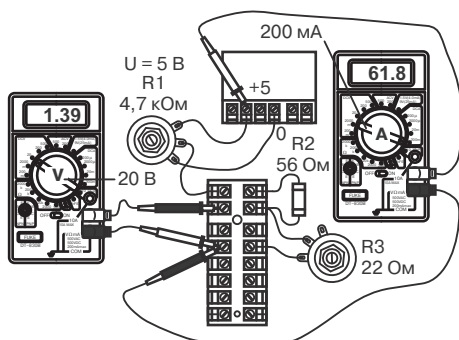


Рис. 2.20. Подвижной контакт в верхнем положении резистора (по схеме)

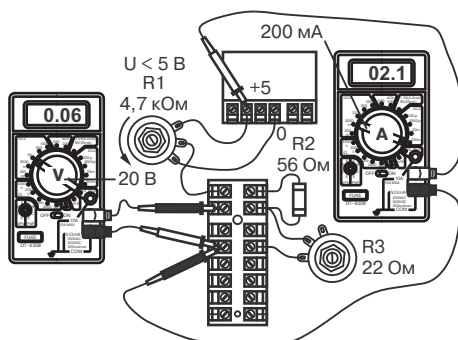


Рис. 2.21. Подвижной контакт — в произвольном положении

Найдем:

$$U = 1,2 \text{ В} + 0,054 \text{ А} \times 56 \text{ Ом} = 4,2 \text{ В}.$$

Случай 2.  $R_3 < 22 \text{ Ом}$ .

1. Подвижной контакт в верхнем положении резистора (по схеме).

Падение напряжения на  $R_1$ :  $U = 5 \text{ В}$ ;  $R_3 = X$ ;

По приборам видно:  $U_{R_3} = 0,8 \text{ В}$ ;

$I = 74,3 \text{ мА} = 0,074 \text{ А}$  (рис. 2.23).

Найдем:

$$R_3 = U/I = 0,8 \text{ В} / 0,074 \text{ А} = 10,8 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{общ}} = 56 + 10,8 = 66,8 \text{ Ом}.$$

Проверим:

$$U = 0,074 \text{ А} \times 66,8 \text{ Ом} = 4,9 \text{ В};$$

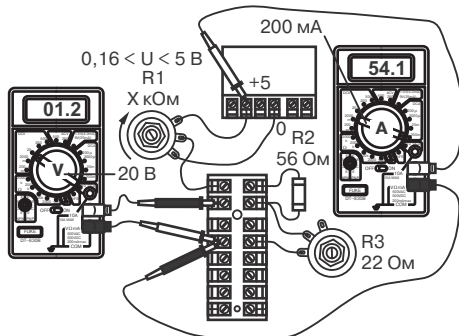


Рис. 2.22. Подвижной контакт в положении ближе к верхнему (по схеме)

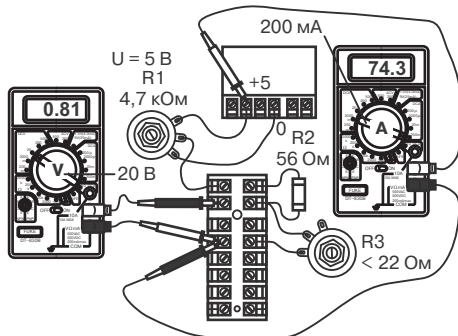


Рис. 2.23. Подвижной контакт в верхнем положении резистора (по схеме)

2. Подвижной контакт — в произвольном положении, по-  
дальше от предыдущего, но  
чтобы приборы не показывали  
ноль.

Падение напряжения на  $R_1$ :  
 $U < 5 \text{ В}$ ;

При  $R_3 = 10,8 \text{ Ом}$ :  $U_{R_3} = 0,03 \text{ В}$ ;  
 $I = 2 \text{ мА} = 0,002 \text{ А}$ ; (рис. 2.24).

Узнаем:

$$U = U_{R_2} + U_{R_3} = 56 \text{ Ом} \times 0,002 \text{ А} + 10,8 \text{ Ом} \times 0,002 \text{ А};$$

$$U = 0,1336 \text{ В}.$$

3. Подвижной контакт в положении  
ближе к верхнему (по схеме).

Падение напряжения на  $R_1$ :  
 $0,16 < U < 5 \text{ В}$ ;

При  $R_3 = 10,8 \text{ Ом}$ :  $U_{R_3} = 0,68 \text{ В}$ ;  
 $I = 63 \text{ мА} = 0,063 \text{ А}$ ; (рис. 2.25)

Найдем:

$$U = 0,68 \text{ В} + 0,063 \text{ А} \times 56 \text{ Ом} = 4,2 \text{ В}.$$

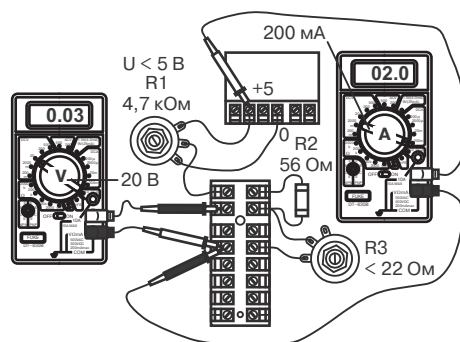


Рис. 2.24. Подвижной контакт — в произвольном положении

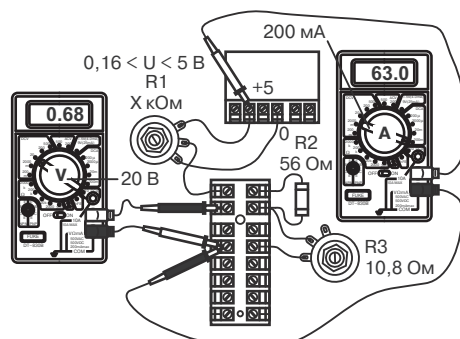


Рис. 2.25. Подвижной контакт в положении ближе к верхнему (по схеме)

Составим таблицу (табл. 2.2):

Результаты измерений

Таблица 2.2

Сопротивление	$R_3 = 22 \text{ Ом}$			$R_3 < 22 \text{ Ом}$		
Напряжение	4,82	0,16	4,2	4,9	0,13	4,2
Сила тока	0,060	0,002	0,054	0,074	0,002	0,063

Строим график зависимости силы тока от напряжения (рис. 2.26).

Из графиков делаем **выводы**:

- ♦ **во-первых**, во сколько раз увеличивают напряжение, во столько раз увеличивается сила тока;
- ♦ **во-вторых**, наклон графиков разный.

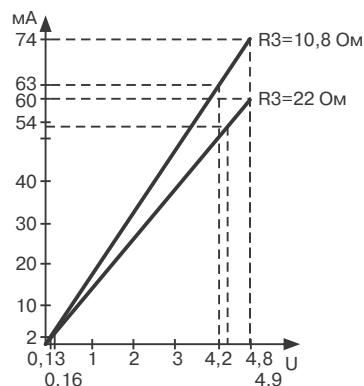


Рис. 2.26. График зависимости силы тока от напряжения

Вычислив отношение напряжения к силе тока, для каждого опыта, выяснили, что в обоих случаях оно постоянно и равно. Эта постоянная величина характеризует свойство проводника, раз она не изменяется в опытах.



### Вывод.

- ♦ Сила тока в участке цепи прямо пропорциональна напряжению на этом участке.
- ♦ Отношение напряжения на участке цепи к силе тока есть величина постоянная для этого участка, и определяет его сопротивление.

### Зависимость силы тока от сопротивления

Будем стараться оставлять напряжение неизменным, чтобы вывести зависимость силы тока от сопротивления. Собираем электрическую цепь по схеме (рис. 2.27):

Сначала соберем цепь с  $R_2 = 30 \text{ Ом}$  (рис. 2.28). Показания приборов:

$$U_1 = 1,01 \text{ В}; I_1 = 30,6 \text{ мА}.$$

Цепь с двумя  $R_{23}$  (рис. 2.29):  $R_2 + R_3 = 30 + 6,8 = 36,8 \text{ Ом}$ .

Показания приборов:  $U_2 = 1,08 \text{ В}; I_2 = 27,1 \text{ мА}$ .

Цепь с тремя  $R_{234}$  (рис. 2.30):  $R_{23} + R_{234} = 36,8 + 6,8 = 43,6 \text{ Ом}$ .

Показания приборов:  $U_3 = 1,00 \text{ В}; I_3 = 21,5 \text{ мА}$ .

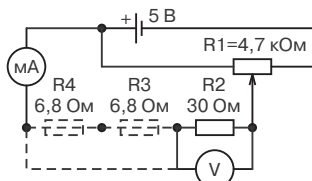


Рис. 2.27. Схема определения зависимости силы тока от сопротивления

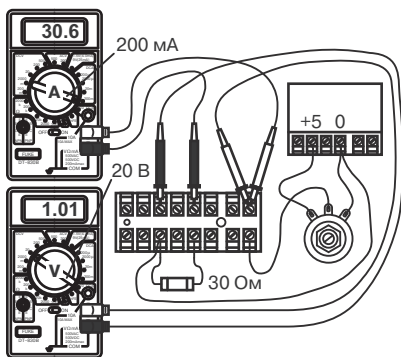


Рис. 2.28. Цепь с  $R_2 = 30 \text{ Ом}$

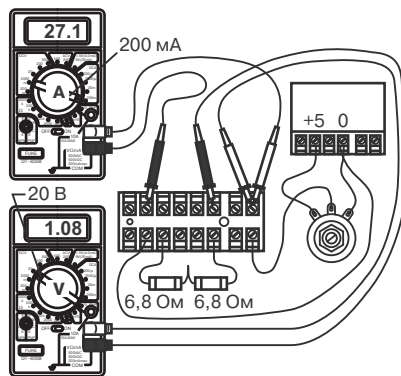


Рис. 2.29. Цепь с двумя  $R_{23}$

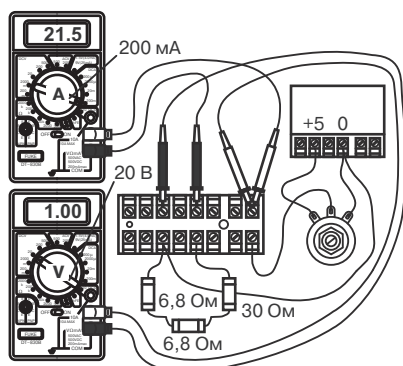
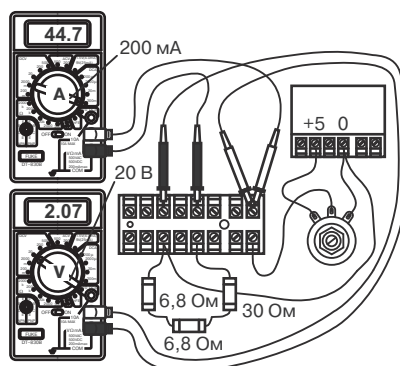
Рис. 2.30. Цепь с тремя  $R_{234}$ 

Рис. 2.31. Напряжение на общем сопротивлении около двух вольт

Теперь, устанавливая напряжение на общем сопротивлении около двух вольт, убираем по одному резистору и записываем показания приборов (рис. 2.31).

При  $U_3 \times 2 = 2,07$  В:  $R_{234} = 43,6$  Ом;  $I_3 \times 2 = 44,7$  мА.

При  $U_2 \times 2 = 1,93$  В (рис. 2.32):  $R_{23} = 36,8$  Ом;  $I_2 \times 2 = 48,7$  мА.

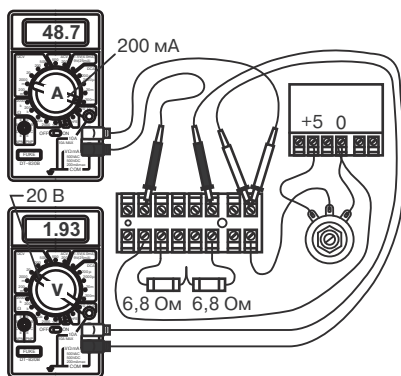
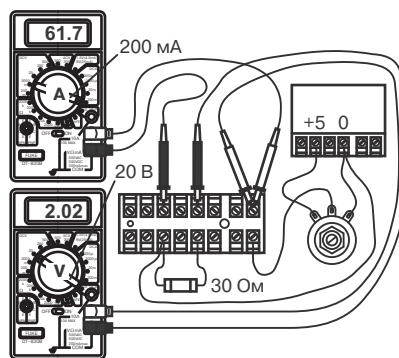
При  $U_1 \times 2 = 2,02$  В (рис. 2.33):  $R_2 = 30$  Ом;  $I_1 \times 2 = 61,7$  мА.

Чертим таблицу зависимость силы тока от сопротивления (табл. 2.3). Строим график (рис. 2.34)



### Вывод.

Из графиков по результатам опыта видим: сила тока уменьшается с увеличением сопротивления.

Рис. 2.32. Схема при  $U_2 \times 2 = 1,93$  ВРис. 2.33. Схема при  $U_1 \times 2 = 2,02$  В

Зависимость силы тока  
от сопротивления

Таблица 2.3

I, мА	R, Ом	U, В
30,6	30	1,01
27,1	36,8	1,08
21,5	43,6	1
44,7	43,6	2,07
48,7	36,8	1,93
61,7	30	2,02

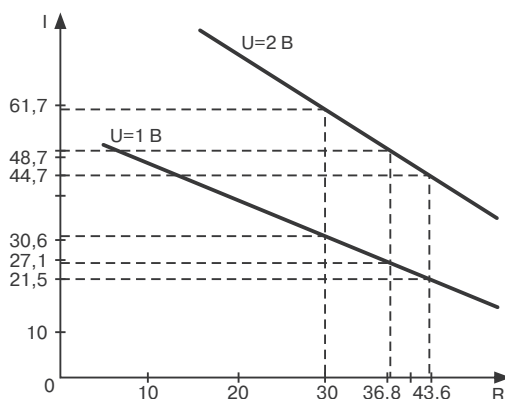


Рис. 2.34. График зависимости  
силы тока от сопротивления

Зависимость, полученная на графиках, называется **обратно пропорциональной**.

Делаем вывод, что сила тока в участке цепи обратно пропорциональна сопротивлению этого участка

$$J \sim 1/R; J = U/R.$$

Учитывая формулы, приходим к следующему выводу.



#### Вывод.

Сила тока в участке цепи прямо пропорциональна напряжению на концах этого участка и обратно пропорциональна его сопротивлению.

Это и есть тот закон, который установил экспериментально, а затем вывел теоретически Георг Ом в 1827 г., а мы с вами сегодня.

## 2.5. Расчет цепей

### Второй закон Кирхгофа



#### Закон.

В замкнутом контуре электрической цепи сумма всех ЭДС равна сумме падения напряжения в сопротивлениях того же контура.

$$E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n = I_1 R_1 + I_2 R_2 + I_3 R_3 + \dots + I_n R_n.$$

При составлении уравнений выбирают направление обхода цепи и произвольно задаются направлениями токов. Если в электрической цепи включены два источника энергии, ЭДС которых совпадают по направлению, т. е. согласно (рис. 2.35, а), то ЭДС всей цепи равна сумме ЭДС этих источников:

$$E = E_1 + E_2.$$

Если же в цепь включено два источника, ЭДС которых имеют противоположные направления, т. е. включены встречно (рис. 2.35, б), то общая ЭДС цепи равна разности ЭДС этих источников:

$$E = E_1 - E_2.$$

Перед началом опыта необходимо сделать замеры напряжения источников (рис. 2.36, рис. 2.37). При последовательном включении в электрическую цепь нескольких источников энергии с различным направлением ЭДС, общая ЭДС равна сумме ЭДС всех источников (рис. 2.38, рис. 2.39).

Складывая ЭДС одного направления, берут со знаком плюс, а ЭДС противоположного направления — со знаком минус.

В нашем случае, при встречном включении, положения щупов пришлось на противоположную полярность источника большего напряжения, поэтому на приборе отрицательный знак (рис. 2.40, рис. 2.41).

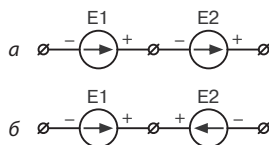


Рис. 2.35. Схема электрической цепи, в которую включены два источника энергии:

а — совпадающие по направлению;

б — со встречным включением

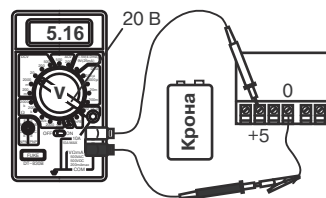


Рис. 2.36. Замер напряжения блока питания



Рис. 2.37. Схема подключения вольтметра



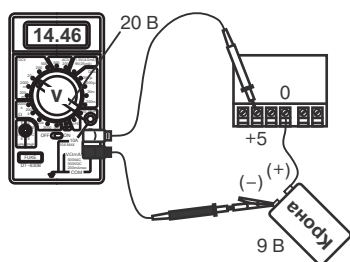


Рис. 2.38. Последовательное включение источников

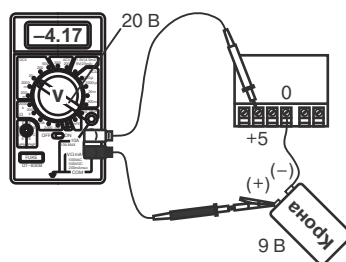


Рис. 2.40. Встречное включение источников

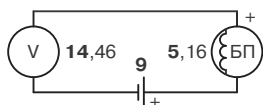


Рис. 2.39. Схема последовательного включения

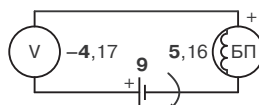


Рис. 2.41. Схема встречного включения

## Метод эквивалентного генератора

Этот метод используется тогда, когда надо определить ток только в одной ветви сложной схемы. Чтобы разобраться с методом эквивалентного генератора, ознакомимся сначала с понятием «двухполюсник».



### Определение.

Часть электрической цепи с двумя выделенными зажимами называется **двухполюсником**.

Двухполюсники, содержащие источники энергии, называются **активными** (можно представить как источник, рис. 2.42). Двухполюсники, не содержащие источников, называются **пассивными** (можно представить как потребитель).

На эквивалентной схеме пассивный двухполюсник может быть заменен одним элементом — внутренним или входным сопротивлением пассивного двухполюсника  $R_{вх}$  (рис. 2.43).

Входное сопротивление пассивного двухполюсника можно измерить. Если известна схема пассивного двухполюсника, входное сопротивление его можно определить, свернув схему относительно заданных зажимов.



Рис. 2.42. Условное обозначение активного двухполюсника

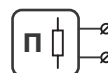


Рис. 2.43. Пассивный двухполюсник и его эквивалентная схема

Дана электрическая цепь (любая) (рис. 2.44). Необходимо определить ток  $I$  в ветви с сопротивлением  $R$  в этой цепи. Выделим эту ветвь, а оставшуюся часть схемы заменим активным двухполюсником.

Согласно **теореме об активном двухполюснике**, любой активный двухполюсник можно заменить эквивалентным генератором (источником напряжения) с ЭДС, равным напряжению холостого хода на зажимах этого двухполюсника и внутренним сопротивлением, равным входному сопротивлению того же двухполюсника, из схемы которого исключены все источники (рис. 2.45).

Искомый ток  $I$  определится по формуле:

$$I = U_{xx} / (R_{вх} + R);$$

Параметры эквивалентного генератора (напряжение холостого хода и входное сопротивление) можно определить экспериментально или расчетным путем. Ниже показан способ вычисления этих параметров расчетным путем. Изобразим схему, предназначенную для определения напряжения холостого хода. В этой схеме ветвь с сопротивлением  $R_1$  разорвана, это сопротивление удалено из схемы (рис. 2.46).

На разомкнутых зажимах появляется напряжение холостого хода. Для определения этого напряжения составим уравнение для первого контура по второму закону Кирхгофа:

$$E_1 = U_{xx} + (R_3 \times I_3).$$

Откуда находим

$U_{xx} = E_1 - (R_3 \times I_3)$ , где  $I_3 = I_2$  определяется из уравнения, составленного по второму закону Кирхгофа для второго контура:

$$I_3 = I_2 = E_2 / R_{вх} + R_2 + R_3;$$

Так как первая ветвь разорвана, ЭДС  $E_1$  не создает ток. Падение напряжения на сопротивлении  $R_{вх1}$  отсутствует. Изображена схема, предназначенная для определения входного сопротивления рис. 2.47.

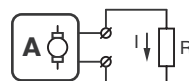


Рис. 2.44.  
Электрическая  
цепь

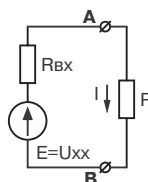


Рис. 2.45. Замена  
активного  
двухполюсника  
эквивалентным  
генератором

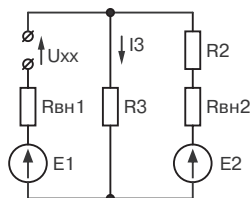


Рис. 2.46. Схема  
определения  
напряжения  
холостого хода

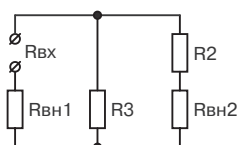


Рис. 2.47. Схема для определения входного сопротивления

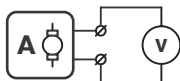


Рис. 2.48. Опыт холостого хода

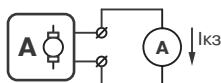


Рис. 2.49. Опыт короткого замыкания

Из схемы удалены все источники ( $E_1$  и  $E_2$ ), т. е. эти ЭДС мысленно закорочены. Входное сопротивление  $R_{вх}$  определяют, свертывая схему относительно зажимов:

$$R_{вх} = R_{вн1} + ((R_{вн2} + R_2) \times R_3 / (R_{вн2} + R_2 + R_3)).$$

Для определения параметров эквивалентного генератора экспериментальным путем необходимо выполнить опыты холостого хода и короткого замыкания.

При проведении опыта холостого хода (рис. 2.48) от активного двухполюсника отключаем сопротивление  $R$ , в котором необходимо определить ток  $I$ . К зажимам двухполюсника подключаем вольтметр и измеряем напряжение холостого хода  $U_{хх}$ .

При выполнении опыта короткого замыкания (рис. 2.49) соединяем проводником зажимы активного двухполюсника и измеряем амперметром ток короткого замыкания  $I_{кз}$ .



### Внимание.

На самом деле, таким образом измерить ток короткого замыкания можно только на источнике малой мощности с большим внутренним сопротивлением, на аккумуляторах и гальванических элементах малой мощности.

Рассчитать ток к.з. можно, зная напряжение холостого хода и входное сопротивление двухполюсника:  $I_{кз} = U_{хх} / R_{вх}$ ; отсюда  $R_{вх} = U_{хх} / I_{кз}$ .

## Сложные электрические цепи

Сложные электрические цепи могут содержать несколько контуров с любым размещением источников энергии и потребителей и не являются набором последовательных и параллельных соединений.

Несмотря ни на что, можно найти распределение токов и напряжений на всех участках любой сложной цепи.

Обычно замкнутая цепь является частью сложной цепи, как показано, например, как на рис. 2.50.

Замкнутая цепь обозначена буквами А, В, С, D. Из-за ответвлений в точках А, В, С, D токи  $I_1, I_2, I_3, I_4$ , отличаясь по величине, могут иметь и различные направления.

Для такой цепи в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно написать:

$$E_1 - E_2 - E_3 = I_1(R_{e1} + R_1) - I_2(R_{e2} + R_2) - I_3(R_{e3} + R_3) + I_4 R_4$$

где  $R_{e1}, R_{e2}, R_{e3}$  — внутренние сопротивления источников энергии;  
 $R_1, R_2, R_3, R_4$  — сопротивления потребителей энергии.

Если внешняя цепь источника энергии с внутренним сопротивлением  $R_e$  состоит, например, из трех последовательно соединенных резисторов с сопротивлениями, соответственно равными  $R_1, R_2, R_3$ , то на основании второго закона Кирхгофа можно написать следующее равенство:

$$E = I(R_e + R_1 + R_2 + R_3).$$

При нескольких источниках тока в левой части этого равенства была бы сумма ЭДС этих источников. При параллельном включении двух или нескольких источников энергии токи, проходящие в них, в общем случае неодинаковы.

Если два параллельно соединенных источника энергии (рис. 2.51), имеющих ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  и внутренние сопротивления  $R_1, R_2$ , замкнуть какое-либо внешнее сопротивление  $R$ , то токи во внешней цепи  $I$  и в источниках  $I_1$  и  $I_2$  можно определить из следующих выражений:

$$I = I_1 + I_2; I = U/R; I_1 = (E_1 - U)/R_1; \\ I_2 = (E_2 - U)/R_2.$$

Отсюда ток во внешней цепи:

$$I = (E_1 R_2 + E_2 R_1) / (R_1 R_2 + R R_1 + R R_2).$$

Токи, протекающие через первый и второй источники энергии:

$$I_1 = (E_1 - IR)/R_1 \text{ и } I_2 = (E_2 - IR)/R_2.$$

**Метод наложения токов** — один из вариантов расчета сложных электрических цепей, принцип которого заключается в том, что ток

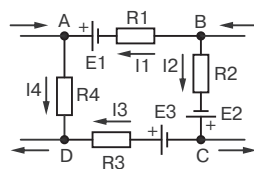


Рис. 2.50. Замкнутая цепь — часть сложной цепи

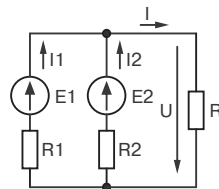
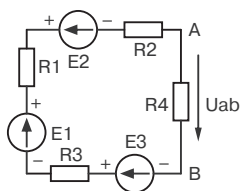


Рис. 2.51. Параллельное включение двух источников энергии



**Рис. 2.52.** Цепь, содержащая три источника с ЭДС и четыре резистора

в какой-либо ветви является суммой токов, создаваемой в ней каждой ЭДС цепи в отдельности.

На рис. 2.52 цепь, содержащая три источника с ЭДС  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  и четыре последовательно соединенных резистора  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ .

Если пренебречь внутренним сопротивлением источников энергии, то сопротивление цепи равно  $R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$ .

Допустим, что ЭДС первого источника  $E_1$  не равно нулю, а второго и третьего равны нулю, т. е.  $E_2 = 0$  и  $E_3 = 0$ .

Далее  $E_2$  не равно 0, а  $E_1 = 0$  и  $E_3 = 0$ . И, попробуем  $E_3$  не равно 0, а  $E_1 = 0$  и  $E_2 = 0$ .

В первом случае ток в цепи, совпадающий по направлению с ЭДС  $E_1$  равен  $I_1 = E_1/R$ ;

Во втором случае ток в цепи, совпадающий по направлению с ЭДС  $E_2$  равен  $I_2 = E_2/R$ ;

В третьем случае ток равен  $I_3 = E_3/R$  и совпадает по направлению с ЭДС  $E_3$ .

Так как  $E_1$  и  $E_3$  совпадают по направлению в контуре, то токи  $I_1$  и  $I_3$  также совпадают, а ток  $I_2$  имеет противоположное направление, так как ЭДС  $E_2$  направлена встречно по отношению к ЭДС  $E_1$  и  $E_3$  (запишутся  $I_2$  и  $U_2$  с противоположными знаками).

Ток в цепи равен:

$$I = I_1 - I_2 + I_3 = E_1/R - E_2/R + E_3/R = (E_1 - E_2 + E_3)/(R_1 + R_2 + R_3 + R_4).$$

Определяя токи, нужно знать сопротивления ветвей, а также значение и направление всех ЭДС. Составляя уравнения по законам Кирхгофа, следует произвольно задаться направлениями токов в ветвях.

Если настоящее направление тока в какой-либо ветви противоположно выбранному, то после решения уравнений этот ток получится со знаком минус.

Число необходимых уравнений равно числу неизвестных токов, при этом число уравнений по первому закону Кирхгофа должно быть на единицу меньше числа узлов цепи. Остальные уравнения составляются по второму закону Кирхгофа, причем следует выбрать наиболее простые контуры и так, чтобы каждый из них содержал хотя бы одну ветвь, не входившую в ранее составленные уравнения.

Расчет сложной цепи с применением уравнений по законам Кирхгофа рассмотрим на примере двух параллельно включенных источников, замкнутых на сопротивление (рис. 2.53).

Пусть ЭДС источников  $E_1 = E_2 = 200$  В, их внутреннее сопротивление  $R_1 = 5$  Ом?

$R_2 = 10$  Ом, сопротивление нагрузки  $R = 30$  Ом.

Так как число неизвестных токов три, то необходимо составить три уравнения.

При двух узловых точках необходимо одно узловое уравнение по первому закону Кирхгофа:

$$I = I_1 + I_2.$$

Второе уравнение напишем при обходе контура, состоящего из первого источника и сопротивления нагрузки:

$$E_1 = I_1 R_1 + IR.$$

Аналогично запишем третье уравнение:

$$E_2 = I_2 R_2 + IR.$$

Подставляя численные значения, получим:

$$200 = 5I_1 + 30 \times I \text{ и } 200 = 10I_2 + 30 \times I$$

Так как  $E_1 - E_2 = 200 - 200 = 0$ , то

$$\begin{aligned} E_1 - E_2 &= (I_1 R_1 + IR) - (I_2 R_2 + IR) = I_1 R_1 + IR - I_2 R_2 - IR = \\ &= I_1 R_1 - I_2 R_2 = 5I_1 - 10I_2 = 0; \\ I_1 &= 10I_2/5 = 2I_2. \end{aligned}$$

Подставим это в  $I = I_1 + I_2$ , получим:  $I = 2I_2 + I_2 = 3I_2$ ;

Подставляя эти значения в выражение для ЭДС  $E_1$ , получим:

$$200 = 2I_2 \times 5 + 3I_2 \times 30 = 100I_2.$$

Отсюда:

$$I_2 = 200/100 = 2 \text{ А}; I_1 = 2I_2 = 4 \text{ А}; I = 2 + 4 = 6 \text{ А}.$$

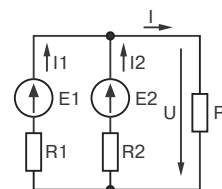


Рис. 2.53. Два параллельно включенных источника, замкнутых на сопротивление

### Метод узловых напряжений

Часто используют метод узлового напряжения, который удобно применять к сложным электрическим цепям, имеющим две узловые

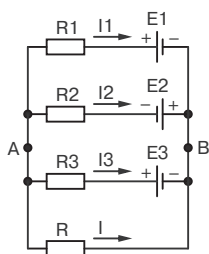


Рис. 2.54. Сложная электрическая цепь, имеющая две узловые точки

точки **A** и **B**, и состоящим из нескольких параллельно соединенных источников энергии, работающих на общее сопротивление (рис. 2.54).

Обозначив потенциалы в узловых точках  $\phi_a$  и  $\phi_b$ , напряжение между этими точками  $U$  можно выразить разностью этих потенциалов, т. е.  $U = \phi_a - \phi_b$ .

Приняв за положительное направление ЭДС и токов в ветвях от узла **a** к узлу **b** для каждой из ветвей, можно написать равенства:

$$I_1 = (\phi_a - \phi_b - E_1)/R_1 = (U - E_1)g_1;$$

$$I_2 = (\phi_a - \phi_b - E_2)/R_2 = (U + E_2)g_2;$$

$$I_3 = (\phi_a - \phi_b - E_3)/R_3 = (U - E_3)g_3;$$

$$I = (\phi_a - \phi_b)/R = Ug,$$

где  $g$  — проводимость.

На основании первого закона Кирхгофа для узловой точки имеем:

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0$$

Подставив в эту сумму значения токов, найдем:

$$(U - E_1)g_1 + (U + E_2)g_2 + (U - E_3)g_3 + Ug = 0,$$

отсюда

$$U = (E_1g_1 - E_2g_2 + E_3g_3)/(g_1 + g_2 + g_3 + g) = \Sigma E g / \Sigma g.$$

Т. е. узловое напряжение равно сумме произведений ЭДС и проводимостей всех параллельных ветвей, деленной на сумму проводимостей всех ветвей.

Вычислив по этой формуле узловое напряжение и воспользовавшись выражениями для токов в ветвях, легко определить эти токи.

### Метод контурных токов

Для определения токов в сложных цепях, содержащих несколько контуров и ЭДС, применяют метод контурных токов. Предполагают, что в ветвях, входящих в состав двух смежных контуров, протекают два контурных тока, из которых первый представляет собой ток одного из смежных контуров, а второй — другого контура.

Действительный ток в рассматриваемом участке цепи определяется суммой или разностью этих двух токов в зависимости от их взаимного относительного направления.

При использовании метода контурных токов составляют уравнения, исходя из суммы сопротивлений, входящих в состав данного контура, и суммы сопротивлений, входящих в состав ветви, общей для смежных контуров.

Первую сумму условно обозначают двойным индексом, например  $R_{11}$ ,  $R_{22}$  и т. д., а вторую сумму — индексом, содержащим номера контуров, для которых данный участок цепи является общим, например  $R_{12}$ ,  $R_{13}$  и т. д.

Если контур содержит несколько источников с ЭДС  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  и т. д., то на основании второго закона Кирхгофа для этого контура можно записать следующее уравнение:

$$E_1 \pm E_2 \pm E_3 \pm \dots = I_1 R_{11} \pm I_2 R_{12} \pm I_3 R_{13} \pm \dots$$



#### Примечание.

В этом уравнении знак «+» или «-» берется в зависимости от взаимного относительного направления ЭДС и токов в контуре. При одинаковом направлении — **плюс**, при противоположном — **минус**.

Аналогичные уравнения могут быть записаны для всех контуров, входящих в сложную электрическую цепь. Таким образом, алгебраическая сумма ЭДС каждого контура равна алгебраической сумме произведения тока в данном контуре на сумму сопротивлений всех звеньев, образующих его, и контурных токов всех контуров, смежных с данным контуром, на сопротивления их общих звеньев.

На рис. 2.55 изображена сложная электрическая цепь, содержащая три контура.

В цепи два источника с ЭДС  $E_1 = 12$  В,  $E_2 = 8$  В и внутренним сопротивлением  $R_{01} = 4$  Ом,  $R_{02} = 3$  Ом, а также пять сопротивлений  $R_1 = 20$  Ом,  $R_2 = 29$  Ом,  $R_3 = 40$  Ом,  $R_4 = 8$  Ом,  $R_5 = 16$  Ом.

Находим сопротивления:

$$R_{11} = R_1 + R_{01} + R_4 = 20 + 4 + 8 = 32 \text{ Ом};$$

$$R_{22} = R_2 + R_{02} + R_5 = 29 + 3 + 16 = 48 \text{ Ом};$$

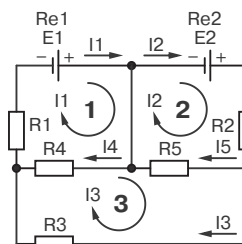


Рис. 2.55. Сложная электрическая цепь, содержащая три контура



$$R_{33} = R_3 + R_4 + R_5 = 40 + 8 + 16 = 64 \text{ Ом};$$

$$R_{13} = R_{31} = R_4 = 8 \text{ Ом};$$

$$R_{23} = R_{32} = R_5 = 16 \text{ Ом}.$$

Составляем уравнения:

- ♦ для контура 1:  $E_1 = I_1 R_{11} - I_3 R_{13}; 12 = 32I_1 - 8I_3;$
- ♦ для контура 2:  $E_2 = I_2 R_{22} - I_3 R_{23}; 8 = 48I_2 - 16I_3;$
- ♦ для контура 3:  $E_3 = I_3 R_{33} - I_1 R_{31} - I_2 R_{32}; 0 = 64I_3 - 16I_2 - 8I_1.$

Решая эти уравнения, находим:

$$I_1 = 0,4 \text{ А};$$

$$I_2 = 0,2 \text{ А};$$

$$I_3 = 0,1 \text{ А};$$

$$I_4 = I_1 - I_3 = 0,3 \text{ А};$$

$$I_5 = I_2 - I_3 = 0,1 \text{ А};$$

## 2.6. Работа и мощность

### Что такое мощность

Для переноса зарядов в замкнутой цепи источник электрической энергии затрачивает известную энергию, равную произведению источника на количество электричества, перенесенного через эту цепь, т. е.  $EQ$ . Часть ее расходуется на преодоление внутреннего сопротивления источника и проводов.

Итак, источник энергии производит полезную работу, равную  $A = UQ$ , где  $U$  — напряжение на приемнике.

Так как количество электричества равно произведению силы тока в цепи на время его прохождения  $Q = It$ , формулу работы можно написать:  $A = UIt$ ;

Электрическая энергия, или работа, есть произведение напряжения, тока в цепи и времени его прохождения.

Если выразить напряжение на зажимах участка цепи как произведение тока на сопротивление этого участка, т. е.  $U = IR$ , то работа будет:

$$A = I^2 Rt.$$

**Определение.**

**Мощностью** называется работа, производимая в единицу времени.

Мощность формульно выражается так:

$$P = A/t = UQ/t = UI = ItR;$$

Работа измеряется в ньютон-метрах или в ватт-секундах (Втс), т. е. в джоулях (Дж), а мощность — в ваттах (Вт).

При малых мощностях применяют единицу, в тысячу раз меньшую одного ватта, называемую милливаттом (мВт);  $1 \text{ Вт} = 1000 \text{ мВт}$ , а для выражения больших мощностей — единицу, в тысячу раз большую ватта, называемую киловаттом (кВт),  $1 \text{ кВт} = 1000 \text{ Вт}$ .

Работа обычно выражается в более крупных единицах: ватт-часах (Вт-ч), гектоватт-часах (гВт-ч) и киловатт-часах (кВт-ч).

Соотношение между этими единицами и джоулем следующее:

$$1 \text{ Вт-ч} = 3600 \text{ Дж}; 1 \text{ гВт-ч} = 100 \text{ Вт-ч}; 1 \text{ кВт-ч} = 1000 \text{ Вт-ч}.$$

При очень малом внешнем сопротивлении  $R$  сила тока в цепи велика, а напряжение на зажимах генератора при этом мало.

При сопротивлении внешней цепи  $R$ , равном нулю, напряжение на генераторе генератора  $U$  также равно нулю, отсюда мощность, потребляемая внешней цепью, равна нулю.

При очень большом внешнем сопротивлении, если внешняя цепь разомкнута, сопротивление ее составляет большую величину, сила тока в цепи равна нулю и мощность, отдаваемая во внешнюю цепь, также равна нулю.

**Примечание.**

Наибольшая мощность во внешней цепи может быть достигнута наличием сопротивления внешней цепи, равного внутреннему сопротивлению генератора.

Нужно учесть, что при равенстве внутреннего сопротивления генератора сопротивлению внешней цепи полезное действие генератора невелико и работа его в таких условиях неэкономична, так как половина всей мощности, развиваемой генератором, расходуется на его внутреннее сопротивление.

### О чем нам говорит закон Ленца-Джоуля

При прохождении электрического тока через металлический проводник электроны сталкиваются то с нейтральными молекулами, то с молекулами, потерявшими электроны.

Движущийся электрон либо отщепляет от нейтральной молекулы новый электрон, теряя свою кинетическую энергию и образуя новый положительный ион, либо соединяется с молекулой, потерявшей электрон (с положительным ионом), образуя нейтральную молекулу.

При столкновении электронов с молекулами расходуется энергия, которая превращается в тепло. Любое движение, при котором преодолевается сопротивление, требует затраты определенной энергии.

Так, например, для перемещения какого-либо тела преодолевается сопротивление трения, и работа, затраченная на это, превращается в тепло. Электрическое сопротивление проводника играет ту же роль, что и сопротивление трения.

Таким образом, для проведения тока через проводник источник тока затрачивает некоторую энергию, которая превращается в тепло.

Переход электрической энергии в тепловую отражает закон Ленца-Джоуля или закон **теплого действия тока**.

Русский ученый Ленц и английский физик Джоуль одновременно и независимо один от другого установили следующее. Это положение называется **законом Ленца-Джоуля**.



#### **Закон.**

*При прохождении электрического тока по проводнику количество теплоты, выделяемое в проводнике, прямо пропорционально квадрату тока, сопротивлению проводника и времени, в течение которого электрический ток протекал по проводнику.*

Если обозначить количество теплоты, создаваемое током, буквой  $Q$  (Дж), силу тока, протекающего по проводнику, —  $I$ , сопротивление проводника —  $R$  и время, в течение которого ток протекал по проводнику, —  $t$ , то закону Ленца-Джоуля можно придать следующее выражение:

$$Q = I^2 R t.$$

Так как  $I = U/R$  и  $R = U/I$ , то  $Q = (U^2/R)t = UI t$ .

### Нагревание проводников электрическим током

На нагревании проводников электрическим током основано устройство электрического освещения электронагревательных приборов, электрических печей, измерительной и медицинской аппаратуры различных типов и т. д.

Из всех видов искусственного освещения наибольшее распространение получила электрическая лампа накаливания, изобретенная А. Н. Лодыгиным в 1873 г. В такой лампе проводник под действием тока нагревается до белого каления и, вследствие этого, излучает свет. Основными частями современной лампы накаливания являются нить накала и стеклянный баллон (колба).

Материалом для изготовления нити накала осветительных ламп служит **вольфрам** (с примесью оксида тория и других элементов). Этот металл обладает высокой температурой плавления ( $3660^{\circ}$ ) и большой механической прочностью.

Электрическое нагревание проводников не всегда оказывает полезное влияние. В проводах линий электропередач вследствие сильного нагрева их при больших токах может создаваться опасность возникновения пожаров.

Во избежание чрезмерного нагрева линейных проводов, а также различных обмоток электрических машин и аппаратов из изолированной проволоки, для электрической аппаратуры установлены нормы максимальных значений сил токов, пропускаемых по данному проводу или обмотке.



#### Определение.

*Ток, при котором устанавливается наибольшая допустимая температура провода, называется **допустимым током**.*

Наибольшая допустимая температура зависит от изоляции провода и способа его прокладки.

### Расчет сечения проводов

Расчет проводов по формулам, основанным на законах нагрева, очень сложен. На практике допустимое для данной силы тока сечение провода определяется по таблицам допустимых длительных токовых нагрузок на провода и кабели (табл. 2.4), приведенным в Правилах устройства электроустановок (ПУЭ).

Таблица допустимых длительных токовых нагрузок

Таблица 2.4

Поперечное сечение провода, мм <sup>2</sup>	Допустимый ток в проводах, А	
	Медные	Алюминиевые
0,50	11	-
1	17	-
2,50	30	24
4	41	32
6	50	36
10	80	55
25	140	105
50	215	165

**Примечание.**

*Провод выбирается такого сечения, чтобы допустимый ток его был равен или больше заданного или расчетного тока. Учтите, из ряда предпочтительных величин сечений (0,75; 1; 1,5; 2,5; 4; 6 мм<sup>2</sup> и т. д.) для алюминиевых проводов сечение выбирают на ступень выше, чем для медных, так как их проводимость составляет примерно 62% от проводимости медных.*

Например, если по расчетам нагрузки для меди нужна величина сечения 2,5 мм<sup>2</sup>, то для алюминия следует брать 4 мм<sup>2</sup>. Если же для меди нужно 4 мм<sup>2</sup>, то для алюминия — 6 мм<sup>2</sup> и т. д.

Помимо нагрева проводов ток, проходя по ним, создает падение напряжения, так как провода обладают сопротивлением. Если расстояние между источником энергии и потребителем  $l$ , то длина двух проводов, соединяющих источник энергии с потребителем, равна  $2l$ .

Сопротивление проводов сечением  $S$  из материала с удельным сопротивлением  $\rho$  равно  $R = \rho (2l/S)$ , а падение напряжения в проводах

$$U_{\text{пров}} = IR = I\rho(2l/S).$$

Таким образом, напряжение на зажимах потребителя  $U_{\text{потр}}$  окажется меньше напряжения в начале линии (источника)  $U_{\text{источ}}$ .

Разность напряжений в начале и в конце линии, равная падению напряжения в проводах, называется потерей напряжения:

$$U_{\text{источ}} - U_{\text{потр}} = U_{\text{потерь}} = IR.$$

Любой приемник энергии очень чувствителен к изменениям напряжения, т. е. отклонениям его от номинального значения.

Так, например, яркость лампы накаливания примерно пропорциональна четвертой степени напряжения.

**Пример.**

*При понижении напряжения на 5% световой поток лампы накаливания уменьшается на 18,5%. А при повышении напряжения на 5% сверх номинального вдвое сокращается срок ее службы.*

Колебания напряжения для осветительной нагрузки не должны превышать — 2,5 + 5%, а для силовой  $\pm 5\%$  и иногда + 10% номинального значения.

Следовательно, допускаемая потеря напряжения в линии не должна превышать тех же значений.

**Задача расчета** сводится к выбору такого сечения провода, при котором обеспечивается нормальное рабочее напряжение на зажимах потребителей электрической энергии, т. е. необходимое сечение проводов линии  $S = 2\rho l / \Delta U_{\text{потерь}}$ .

Найденное по этой формуле сечение, округленное до ближайшего, большего стандартного, должно быть проверено на допустимый нагрев.

Для относительно коротких линий (осветительные сети промышленных предприятий, общественных и жилых зданий) сечение проводов выбирают в зависимости от допустимого нагрева, так как потеря напряжения обычно оказывается меньше допустимой.

Мощность потерь в линии электропередачи равна:

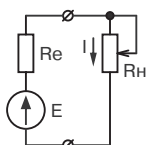
$$\Delta P_{\text{потерь}} = \Delta U_{\text{потерь}} \times I = I^2 R.$$

Для защиты аппаратов, машин и приборов от чрезмерно больших токов устанавливают предохранительные устройства (предохранители, реле, автоматы), которые автоматически прерывают цепь тока, как только его величина превысит норму.

## 2.7. Режимы цепи

### Характерные режимы работы сети

Электрической цепи могут работать в различных режимах. Режимы работы характеризуются значениями тока и напряжения. Режимов может быть довольно много, так как, и ток и напряжение могут принимать любые значения.



**Рис. 2.56.**  
Электрическая цепь  
с источником ЭДС  
и регулируемым  
сопротивлением

Рассмотрим наиболее характерные режимы работы электрической цепи с источником ЭДС, к которому подключен электроприемник с регулируемым сопротивлением  $R_n$  (рис. 2.56).

Пусть источник характеризуется постоянной ЭДС  $E$  и внутренним сопротивлением  $R_e = \text{const}$ .

Ток в цепи изменяется при изменении сопротивления  $R_n$  электроприемника, который является линейным элементом.

По второму закону Кирхгофа можно записать

$$E = R_n I + R_e I$$

где  $R_n I = U$  — напряжение на зажимах приемника, т. е. напряжение на зажимах внешней цепи;

$R_e I$  — падение напряжения внутри источника ЭДС.

Так как приемник присоединен непосредственно к зажимам источника ЭДС, то напряжение  $U$  одновременно является напряжением и на его зажимах. Из уравнения  $E = R_n I + R_e I$  получаем, что  $U = E - R_e I$ .

Это уравнение, описывающее зависимость напряжения внешней цепи от тока в ней, является уравнением внешней характеристики источника ЭДС.

При условии  $E = \text{const}$  и  $R_e = \text{const}$  зависимость напряжения и тока является **линейной**.

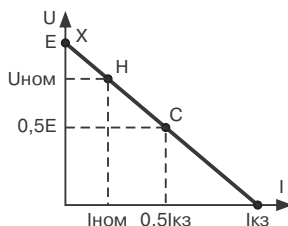
Подобные режимы удобнее всего рассматривать, пользуясь внешней характеристикой (рис. 2.57).

**1. Режим холостого хода** — это режим, при котором ток в цепи  $I = 0$ , что имеет место при разрыве цепи.

Как следует из уравнения  $E = R_n I + R_e I$ , при холостом ходе напряжение на зажимах источника ЭДС  $U = E$ .

Поэтому вольтметр — прибор с очень большим сопротивлением, будучи включенным в такую цепь, измеряет ЭДС источника. На внешней характеристике точка холостого хода обозначена  $X$ .

**2. Номинальный режим** будет тогда, когда источник ЭДС или любой другой элемент цепи работает при значениях тока, напряжения и мощности, указанных в паспорте данного электротехнического устройства.



**Рис. 2.57.** Внешняя  
характеристика  
источника ЭДС

Номинальные значения тока  $I_{\text{ном}}$ , напряжения  $U_{\text{ном}}$  и мощности  $P_{\text{ном}}$  соответствуют самым выгодным условиям работы устройства с точки зрения экономичности, надежности, долговечности и т. п.

На внешней характеристике точка, соответствующая номинальному режиму, обозначена Н.

**3. Режим короткого замыкания** — это режим, когда сопротивление приемника равно нулю, что соответствует соединению разнопотенциальных зажимов источника ЭДС проводником с нулевым сопротивлением.

Из уравнения  $E = R_{\text{н}} I + R_{\text{е}} I$  следует, что ток в цепи в любом из режимов  $I = E / (R_{\text{н}} + R_{\text{е}})$ .

При коротком замыкании цепи, когда  $R_{\text{н}} = 0$ , ток достигает максимального значения  $I_{\text{кз}} = E / R_{\text{е}}$ , ограниченного внутренним сопротивлением  $R_{\text{е}}$  источника ЭДС, а напряжение на зажимах источника ЭДС  $U = R_{\text{н}} I = 0$ .

Значению тока  $I_{\text{кз}}$  и напряжению  $U = 0$  соответствует точка кз на внешней характеристике источника ЭДС.

Ток короткого замыкания может достигать больших значений, во много раз превышая номинальный ток. Поэтому режим короткого замыкания для большинства электроустановок является аварийным режимом.

**4. Согласованный режим** источника ЭДС и внешней цепи имеет место, когда сопротивление внешней цепи  $R_{\text{н}} = R_{\text{е}}$ .

В согласованном режиме ток в цепи  $I_{\text{сог}} = E / (R_{\text{е}} + R_{\text{е}}) = 0,5 I_{\text{кз}}$ , т. е. в два раза меньше тока короткого замыкания.

ЭДС источника  $E$  уравнивается двумя равными по значению падениями напряжения, обусловленными сопротивлением внешней цепи и внутренним сопротивлением, т. е.  $U = 0,5E$ .

Точка, соответствующая согласованному режиму, на внешней характеристике обозначена С.

### Соотношение мощностей в электрической цепи

Пользуясь предыдущей схемой, умножим все члены уравнения  $E = R_{\text{н}} I + R_{\text{е}} I$  на  $I$  получим уравнение баланса мощностей электрической цепи  $P_{\text{е}} = P_{\text{потр}} + P_{\text{потери}}$ , где

$P_{\text{е}}$  — мощность источника ЭДС (источника электроэнергии);

$P_{\text{потр}}$  — мощность, потребляемая электроприемником;

$P_{\text{потери}}$  — потеря мощности в источнике электроэнергии.



Записав  $P_{\text{потр}} = UI = RI^2 = E^2 R_n / (R_n + R_e)^2$ , получим зависимость мощности приемника от его сопротивления при  $E = \text{const}$  и  $R_e = \text{const}$ .

Мощность  $P_{\text{потр}}$  определяется в режиме холостого хода, когда  $I = 0$ , и в режиме короткого замыкания, когда  $U = 0$ , равна нулю.

Следовательно, зависимость  $P_{\text{потр}}$  и  $I$  при изменении тока  $I$  от 0 до  $I_{\text{кз}}$  имеет максимум. Этот максимум соответствует согласованному режиму, когда  $R_n = R_e$ .

Таким образом, приемник потребляет максимальную мощность при согласованном режиме, когда  $R_n = R_e$ .

С учетом этого равенства  $R_n = R_e$  из формулы  $P_{\text{потр}} = UI = RI^2 = E^2 R_n / (R_n + R_e)^2$  определим значение мощности  $P_{\text{потр. макс}}$  или мощности  $P_{\text{потр. согл}}$  в согласованном режиме:

$$P_{\text{потр. макс}} = P_{\text{потр. согл}} = E^2 R_e / (2R_e)^2 = E^2 / (4R_e).$$

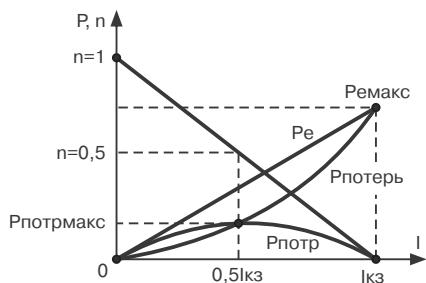


Рис. 2.58. Графики зависимостей  $P_e$ ,  $P_{\text{потр}}$ ,  $P_{\text{потерь}}$  и  $n$  от тока в цепи

Мощность  $P_{e \text{ согл}}$ , развиваемая источником электроэнергии в согласованном режиме, если учесть

$$I_{\text{согл}} = E / (R_e + R_e) = 0,5 I_{\text{кз}},$$

$$P_{e \text{ согл}} = E I_{\text{согл}} = E^2 / (2R_e).$$

Наибольшую мощность источник электроэнергии развивает при коротком замыкании, когда ток достигает наибольшего значения.

В этом случае

$$P_{e \text{ макс}} = E I_{\text{кз}} = E^2 / R_e.$$

Мощность источника в согласованном режиме в два раза меньше его максимальной мощности.

Коэффициент полезного действия (КПД) источника электроэнергии в согласованном режиме

$$\eta_0 = P_{\text{потр. согл}} / P_{e \text{ согл}} = 0,5.$$

Из-за такого низкого значения КПД, обусловленного большими потерями мощности и энергии в источнике питания и сетях, согласованный режим в промышленных установках не применяют.

Однако этот режим имеет преимущество перед другими режимами, заключающееся в том, что при  $E = \text{const}$  мощность приемника достигает наибольшего значения.

**Примечание.**

*Поэтому согласованный режим применяют в цепях с малыми токами (схемы автоматики, электрических измерений, связи), т. к. в них КПД не имеет решающего значения.*

Зависимости  $P_e$ ,  $P_{\text{потр}}$ ,  $P_{\text{потерь}}$  и  $\eta$  от тока в цепи показаны на (рис. 2.58). При их построении принималось во внимание, что  $E = \text{const}$  и  $R_e = \text{const}$ .

Зависимость ( $P_e$  и  $I$ ) от  $EI$  имеет линейный характер.

Потери мощности в источнике электроэнергии квадратично зависят от тока, причем при токе короткого замыкания

$$P_{\text{потерь}} = R_e I_{\text{кз}}^2 = R_e E^2 / R_e^2 = E^2 / R_e = P_{e \text{ макс}}.$$

Наибольшее значение мощность электроприемника  $P_{\text{потр макс}}$  имеет при согласованном режиме, т. е. при  $I = 0,5I_{\text{кз}}$ .

Так как КПД

$$\eta = P_{\text{потр}} / P_e = (P_e - P_{\text{потерь}}) / P_e = 1 - R_e I / E = 1 - I / I_{\text{кз}},$$

то зависимость  $\eta$  и  $I$  линейна.

При номинальном режиме КПД много выше, чем при согласованном режиме.

**Примечание.**

*Для большинства промышленных источников электроэнергии при номинальном режиме  $\eta = 0,8—0,9$ .*

Следовательно,  $I_{\text{ном}} = (0,1—0,2)I_{\text{кз}}$ , т. е. номинальный ток во много раз меньше тока короткого замыкания.

### **Расчет мощности и КПД в цепи постоянного тока с переменным сопротивлением и источником компьютерного блока питания**

Исследование изменения тока, напряжений и мощности в цепи с одним переменным сопротивлением. При выполнении работы необходимо хорошо представлять, какие особенности реализуются в электрической цепи (рис. 2.59).

Рассмотрим схему. В первую очередь поставим вольтметр на изменение падения напряжения на источнике питания +12 В, от +12 В провод идет на переменное сопротивление 4,7 кОм, параллельно ему

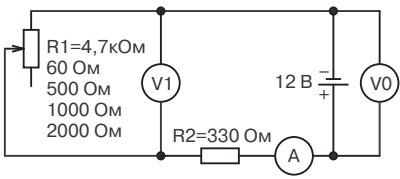


Рис. 2.59. Схема для определения изменения тока, напряжений и мощности

включен вольтметр, чтобы измерять падение напряжения на нем. Далее идет постоянный резистор на 330 Ом и через амперметр на минус питания.

**Включим приборы.** Амперметр подключен на выводы резистора. Им же мы будем измерять его значения в разных случаях, т. е. перед тем как

включить блок питания, мы отключаем провод от блока питания, чтобы замерить сопротивление на переменном резисторе. Прибор ставим на сопротивление, запишем самое малое значение 60 Ом на переменном резисторе. Прибор подсоединяем на место, ставим прибор в режим вольтметра и включаем блок питания.

Записываем показания в табл. 2.5.

При резисторе с сопротивлением 60 Ом ток равен 0,03 мА:

- ♦ падение напряжения на источнике составляет 11,96 В;
- ♦ падение напряжение на резисторе составляет 1,64 В.

Далее поочередно меняем величину сопротивления на резисторе и записываем полученные показания в табл. 2.5.

При резисторе с сопротивлением 500 Ом  $I = 0,02$  мА:

- ♦ падение напряжения на источнике составляет 11,97 В;
- ♦ падение напряжение на резисторе составляет 6,92 В.

При резисторе с сопротивлением 1000 Ом  $I = 0,009$  мА:

- ♦ падение напряжения на источнике составляет 11,97 В;
- ♦ падение напряжение на резисторе составляет 8,85 В.

Изменения тока, напряжений и мощности в цепи с одним переменным сопротивлением

Таблица 2.5

№ опыта	Результаты опыта				Расчетные величины					
	$E_1$ В	$I$ мА	$U_0$ В	$U_1$ В	$R_0$ Ом	$r$ Ом	$P_{потерь}$ Вт	$P_0$ Вт	$P_H$ Вт	$h$
1. $R_1 = 0$	12,03			---						
2. $R_1 = 60$ Ом	12,03	0,03	11,96	1,64	0,4	390	0,0004	0,3704	0,37	0,9
3. $R_1 = 500$ Ом	12,03	0,02	11,97	6,92	0,4	830	0,0002	0,1702	0,17	0,99
4. $R_1 = 1000$ Ом	12,03	0,009	11,97	8,85	0,4	1330	0,00001	0,10001	0,1	0,999
5. $R_1 = 2000$ Ом	12,03	0,005	11,97	10,2	0,4	2330	0,00001	0,06001	0,06	0,999

После того как мы записали все показания в табл. 2.5, можно приступить к расчетам:

$$R_0 = (U_{05} - U_{02}) / (I_5 - I_2) = (11,97 - 11,96) / (0,005 - 0,03) = 0,01 / 0,025 = 0,4 \text{ Ом};$$

$$P_{потр2} = UI = RI^2 = E^2 R_H / (R_H + R_c)^2 = 12,03^2 \times 390 / (390 + 0,4)^2 = 0,37 \text{ Вт};$$

$$\begin{aligned}
 P_{\text{потр}3} &= 0,17 \text{ Вт}; \\
 P_{\text{потр}4} &= 0,1 \text{ Вт}; \\
 P_{\text{потр}5} &= 0,06 \text{ Вт}; \\
 P_{\text{потр}макс} &= P_{\text{потр}согл} = E^2 R_e / (2R_e)^2 = \\
 &= E^2 / (4R_e) = 12,03^2 / (4 \times 0,4) = 90,5 \text{ Вт}; \\
 I_{\text{сог}} &= E / (R_c + R_e) = 0,5 I_{\text{кз}}; \\
 P_{\text{есогл}} &= E I_{\text{согл}} = E^2 / (2R_e) = 12,03^2 / (2 \times 0,4) = \\
 &= 180 \text{ Вт}; \\
 P_{\text{е}макс} &= E I_{\text{кз}} = E^2 / R_e = 12,03^2 / 0,4 = 361 \text{ Вт}; \\
 \eta_0 &= P_{\text{потр}согл} / P_{\text{есогл}} = 0,5; \\
 P_{\text{потерь}} &= R_e I_{\text{кз}}^2 = R_e E^2 / R_e^2 = E^2 / R_e = P_{\text{е}макс}; \\
 P_{\text{потерь}2} &= 0,4 \times 0,03^2 = 0,0004 \text{ Вт}; \\
 P_{\text{потерь}3} &= 0,0002 \text{ Вт}; \\
 P_{\text{потерь}4} &= 0,0001 \text{ Вт}; \\
 P_{\text{потерь}5} &= 0,0001 \text{ Вт}; \\
 P_e &= P_{\text{потр}} + P_{\text{потери}}; \\
 P_{e2} &= 0,37 + 0,0004 = 0,3704 \text{ Вт}; \\
 P_{e5} &= 0,06 + 0,00001 = 0,0604 \text{ Вт}; \\
 \eta &= P_{\text{потр}} / P_e = (P_e - P_{\text{потерь}}) / P_e = 1 - R_e I / E = 1 - I / I_{\text{кз}}; \\
 \eta_2 &= 1 - 0,03 / 30 = 0,999; \\
 \eta_5 &= 1 - 0,005 / 30 = 0,9999.
 \end{aligned}$$

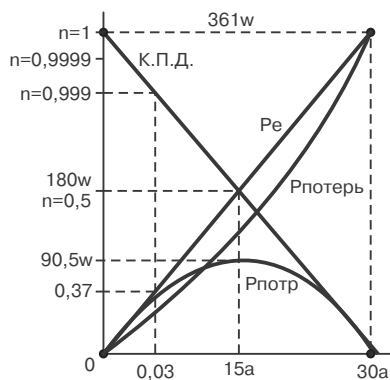


Рис. 2.60. Графики тока, напряжений и мощности

## 2.8. Химические источники

### Первое знакомство

Растворы солей и кислот в воде или в каком-либо другом растворе проводят электрический ток и называются **электролитами** или **проводниками второго рода** в отличие от металлических проводников, называемых **проводниками первого рода**.

Электрический ток может проходить через среды, имеющие электрически заряженные частицы, обладающие способностью перемещаться.

При растворении солей и кислот в воде или в каком-либо ином растворителе (этиловый спирт, бензин, бензол и др.) часть молекул распадается на две части, называемые **ионами**, причем одна часть имеет положительный заряд, другая — отрицательный заряд.

Пусть в сосуд с электролитом погружены две металлические пластины, называемые **электродами**, которые при помощи проводочных проводников присоединены к источнику энергии постоянного тока. Вследствие разности потенциалов между электродами через электролит будет протекать ток.

Прохождение тока через электролит сопровождается химическим процессом, называемым **электролизом**. Находящиеся в электролите ионы, притягиваясь к электродам, двигаются в противоположных направлениях: положительные ионы — к катоду, а отрицательные ионы — к аноду.

Подойдя к катоду, положительные ионы получают от него недостающие им электроны и образуют электрически нейтральные атомы. На аноде происходит обратный процесс: отрицательные ионы отдают аноду свои избыточные электроны.

При прохождении электрического тока через электролит на электродах выделяется определенное количество веществ, содержащихся в виде химического соединения в электролите.

### Первый закон Фарадея

Зависимость выделенного вещества от силы тока устанавливается двумя законами Фарадея. **Первый закон Фарадея** сформулирован так.



#### **Закон.**

*Количество вещества, выделившегося на электродах при прохождении тока через электролит, прямо пропорционально количеству электричества, прошедшему через электролит.*

При прохождении одного кулона электричества из электролита выделяется определенное количество массы вещества, которое называется **электрохимическим эквивалентом** данного вещества.

В практических расчетах для определения количества электричества удобнее пользоваться не кулонами, а ампер-часами (А-ч).

Так как один кулон равен ампер-секунде, то между ампер-часом и кулоном имеет место следующее соотношение:

$$1 \text{ А-ч} = 3600 \text{ А-с} = 3600 \text{ Кл.}$$

Электрохимический эквивалент  $K$  выражается в граммах, отнесенных к одному ампер-часу количества электричества (г/А-ч), т. е. это

количество массы вещества, выделившегося из электролита и выраженное в граммах, при прохождении через электролит одного ампер-часа количества электричества.

### Второй закон Фарадея

**Второй закон Фарадея** гласит: *при одном и том же количестве электричества, протекающего через различные электролиты, количества массы веществ, выделившихся на электродах, пропорциональны их химическим эквивалентам.*

Из сопоставления 1-го и 2-го законов Фарадея вытекает, что электрохимические эквиваленты  $K$  пропорциональны их химическим эквивалентам, т. е.

$$K_1/a_1 = K_2/a_2 = K_3/a_3 = \dots$$

Следовательно, отношение электрохимических эквивалентов к их химическим эквивалентам является величиной постоянной и равной

$$K/a = 3,72/100 = 0,0372.$$

Итак, второй закон Фарадея может быть выражен следующим образом.

$$K = a \times 0,0372.$$

Электролиз получил широкое применение в различных отраслях промышленности: в гальванопластике, гальваностегии, для очистки (рафинирования) металлов и др.

### Гальванические элементы

Проводники первого рода (твердые) и второго рода (жидкие электролиты) совместно используются в гальванических элементах, служащих источниками постоянного тока.

В гальванических элементах (рис. 2.61) во время их работы происходит движение ионов и оседание на электродах элемента, выделяющегося из электролита вещества.

Простейшим гальваническим элементом является медно-цинковый.

В стеклянный сосуд, наполненный раствором серной кислоты в воде, погружены медная и цинковая пластины, которые представляют

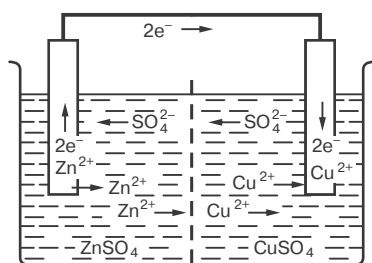


Рис. 2.61. Простейший гальванический элемент

собой положительный и отрицательный полюсы элемента.

При замыкании цепи элемента каким-либо проводником внутри этого элемента будет проходить ток от цинковой отрицательной пластины к медной положительной, а во внешней цепи от медной к цинковой.

Под действием тока внутри элемента положительные ионы водорода движутся по направлению тока, отрицательные ионы кислотного остатка — в противоположном направлении.

Соприкасаясь с медной пластиной, положительные ионы водорода отдают ей свои заряды, а водород в виде пузырьков газа скапливается на ее поверхности.

В это же время отрицательные ионы остатка серной кислоты отдают свои заряды цинковой пластине. Таким образом, происходит непрерывный заряд пластин элемента, поддерживающий разность потенциалов (напряжение) на его зажимах.

Выделение водорода на медной пластине элемента ослабляет его действие — поляризует элемент.

**Явление поляризации** состоит в том, что накапливающийся на положительном электроде водород создает в совокупности с металлом электрода дополнительную разность потенциалов, называемую **электродвижущей силой поляризации**. Эта ЭДС направлена противоположно электродвижущей силе элемента.

Кроме того, пузырьки водорода, покрывающие часть медной пластины, уменьшают ее действующую поверхность, а это увеличивает внутреннее сопротивление элемента.

Поляризация в рассмотренном элементе настолько значительна, что делает его непригодным для практических целей.

Для устранения явления поляризации в состав элемента вводят поглотитель (деполяризатор), который предназначен для поглощения водорода и недопускает скопления его на положительном полюсе элемента.

Деполяризаторами могут служить химические препараты, богатые кислородом или хлором.

Электродвижущая сила медно-цинкового элемента равна 1,1 В, а внутреннее сопротивление в зависимости от времени работы — 5...10 Ом.

В угольно-цинковом элементе положительным полюсом служит угольная пластина, а отрицательным — цинковый стержень.

Деполаризатором в этом элементе является спрессованная под большим давлением смесь, называемая **агломератом**. Она состоит из перекиси марганца и графита.

В качестве электролита в угольно-цинковом элементе применяют водный раствор хлористого аммония.

Электродвижущая сила угольно-цинкового элемента 1,4—1,5 В в начале разряда при среднем значении 0,9—1,1 В, а внутреннее сопротивление в зависимости от конструкции элемента — 0,25...0,7 Ом в начале разряда и 1,4—5 Ом в конце.

Угольно-цинковые элементы выпускаются в виде так называемых сухих элементов «стаканчик» и галетного типов, весьма удобных для переноски и перевозки.

В сухих элементах типа «стаканчик» положительный полюс с агломератом помещают внутри цинковой коробки, которая служит отрицательным полюсом элемента.

Пространство между стенками цинковой коробки и агломератом заполняют пастой, состоящей из раствора хлористого аммония и картофельной муки (рис. 2.62).

Над агломератом укладывают картонную прокладку, на которую насыпают прослойку опилок; сверху опилки закрывают прокладкой.

Затем элемент заливают смолой, в которую вставляют трубку. Назначение этой трубки — удалять образующиеся внутри элемента газы.

На выходящий из смолы угольный электрод насаживают медный колпачок с винтом и гайкой для присоединения проводника.

К верхней части цинковой коробки (отрицательному полюсу) припаивают изолированный гибкий проводник. На дно коробки укладывают изолирующую прокладку.

В галетном элементе отрицательным электродом является цинковая пластина, положительным — спрессованный в виде галеты порошок двуокиси марганца с углем.

Между электродами помещают картонную пластинку, пропитанную раствором нашатырного спирта.



Рис. 2.62. Сухой элемент типа «стаканчик»



Наружная поверхность цинковой пластины покрыта слоем канифоли с частицами графита для электропроводности.

В качестве изоляции применяют хлорвиниловые пленки.

Галетные элементы компактны и их активные материалы (особенно цинк) используются лучше, чем в элементах «стаканчик».

## Аккумуляторы



### Определение.

**Аккумулятором** называется прибор, обладающий способностью накапливать и сохранять в течение некоторого времени электрическую энергию в результате химических процессов.



Рис. 2.63. Современные аккумуляторы

В аккумуляторе (рис. 2.63), как и в гальваническом элементе, электрический ток является следствием химических процессов.

Но в отличие от аккумулятора в гальваническом элементе получающиеся химические соединения не могут быть вторично разложены и приведены в первоначальное состояние током постороннего источника.



### Примечание.

Поэтому гальванические элементы называются **первичными**, а аккумуляторы — **вторичными** или **обратимыми**.

Повторные заряд и разряд не только не вредят аккумулятору, но даже улучшают его свойства, так как в работе участвуют все более глубокие слои пластин электродов.

В зависимости от состава электролита аккумуляторы могут быть кислотными и щелочными.

**Простейший кислотный аккумулятор** состоит из двух свинцовых пластин (электродов), погруженных в электролит, которым служит вода с небольшим добавлением серной кислоты.

Постоянный ток постороннего источника, проходя через электролит, разлагает его на составные части.

Внутри электролита возникает движение положительных ионов водорода  $H_2$  к пластине, соединенной с отрицательным зажимом источника тока, и отрицательных ионов кислорода  $O$  к пластине, соединенной с положительным зажимом источника тока.

В результате электролиза окисляется свинец на положительном электроде и образуется губчатый свинец на отрицательном электроде.

Если аккумулятор отключить от источника тока и замкнуть на какой-нибудь приемник энергии, то аккумулятор сам станет источником тока подобно гальваническому элементу, у которого электродами служат пластины, отличающиеся друг от друга по химическому составу.

Электролитом в кислотных аккумуляторах, как указывалось выше, служит раствор кислоты определенной плотности.



#### Определение.

**Плотность раствора** называется число, показывающее, во сколько раз масса этого раствора больше массы воды того же объема.

При составлении раствора для аккумуляторов серную кислоту тонкой струей наливают в воду. **Нельзя вливать в серную кислоту воду**, так как произойдет бурное разбрызгивание кислоты, которая может причинить ожоги. Вода для электролита должна быть дистиллированной.

ЭДС аккумулятора зависит от плотности электролита и не зависит от его размеров и номинальной емкости. В процессе заряда и разряда аккумулятора плотность электролита не остается постоянной, в связи с этим изменяется как его ЭДС, так и напряжение на его зажимах.

График изменения напряжения кислотного аккумулятора (рис. 2.64): 1 — при заряде, 2 — при разряде.



Рис. 2.64. График изменения напряжения кислотного аккумулятора



#### Определение.

Количество электричества, которое аккумулятор может отдать при разряде определенным током до низшего допустимого напряжения, называется его **емкостью**.

Емкость равна произведению разрядного тока в амперах на продолжительность времени разряда в часах и выражается в ампер-часах.

Емкость аккумулятора зависит от количества активной массы, величины тока и температуры.



### Определение.

*Под **номинальной емкостью** понимают то количество электричества, которое отдает полностью заряженный аккумулятор при 10-часовом режиме разряда и температуре 25°C.*

Таким образом, аккумулятор отдает номинальную емкость, разряжаясь в течение 10 ч током, численно равным 0,1 величины его номинальной емкости.

При увеличении разрядного тока емкость аккумулятора уменьшается, так как поверхность пластин покрывается сернокислым свинцом и затрудняет доступ электролита к внутренним слоям активной массы.

При понижении температуры увеличивается вязкость электролита, что также затрудняет его доступ к внутренним слоям активной массы и уменьшает емкость аккумулятора.



Рис. 2.65. Схема соединения пластин кислотного аккумулятора

Для увеличения емкости аккумулятора несколько одноименных пластин соединяют параллельно (рис. 2.65).

Каждая группа положительных и отрицательных пластин работает как одна большая пластина, площадь которой равна сумме площадей параллельно соединенных пластин.

Так как положительные пластины должны находиться между отрицательными, число отрицательных пластин всегда на одну больше числа положительных.

При этом условии обе стороны положительных пластин вступают во взаимодействие с электролитом (при односторонней работе положительные пластины коробятся и при соприкосновении с отрицательными пластинами может произойти короткое замыкание).



Рис. 2.66. Кислотный аккумулятор

Стационарные кислотные аккумуляторы изготавливают в стеклянных или керамических сосудах (рис. 2.66). Аккумуляторы больших емкостей имеют сосуды деревянные, выложенные внутри свинцом или кислотостойким изоляционным материалом.

Кислотные аккумуляторы применяют на электротехнических установках стационарного типа и на автотранспорте. В качестве переносных аккумуляторов используют преимущественно щелочные аккумуляторы.

### Щелочные аккумуляторы

Сосуды щелочных аккумуляторов сваривают из тонкой листовой стали и с наружной стороны никелируют (рис. 2.67). В центре крышки сосуда имеется отверстие для заливки аккумуляторов электролитом.

ЭДС щелочных аккумуляторов зависит от состояния активной массы пластин. От температуры и плотности электролита ЭДС зависит незначительно и только при низких температурах, близких к нулю, она резко изменяется.

Напряжение в конце заряда аккумулятора равно 1,8 В, по окончании заряда — 1,5...1,55 В. ЭДС разряженного аккумулятора — 1,3 В.

Достоинства щелочных аккумуляторов:

- ♦ они не требуют тщательного ухода;
- ♦ не боятся сотрясений;
- ♦ могут длительно оставаться в разреженном состоянии;
- ♦ выносят короткие замыкания, которые для кислотных аккумуляторов представляют большую опасность;
- ♦ саморазряд у щелочных аккумуляторов меньше, чем у кислотных.

В зависимости от материала электродов щелочные аккумуляторы могут быть кадмиево-никелевые, железо-никелевые, серебряно-цинковые, золото-цинковые и газовые.

Применение в массовом масштабе золото-цинковых аккумуляторов ограничивается их высокой стоимостью.

Газовые аккумуляторы отличаются легкостью и дешевизной, но технология их производства разработана еще недостаточно.

Наиболее широкое распространение получили кадмиево-никелевые (КН) и желе-



Рис. 2.67. Щелочные аккумуляторы

зоникелевые (ЖН) аккумуляторы, электролитом которых служит раствор едкого кали в воде; плотность электролита 1,2.

По своему устройству и электрическим данным аккумуляторы КН и ЖН незначительно отличаются друг от друга.

Активную массу запрессовывают в брикеты (пакеты), а затем из брикетов собирают отдельные пластины. У аккумуляторов типа ЖН отрицательных пластин на одну больше, чем положительных.

У аккумуляторов типа КН положительных пластин на одну больше, чем отрицательных. Один из полюсов аккумулятора соединяется с сосудом (у ЖН — отрицательный, а у КН — положительный полюс).

Серебряно-цинковый аккумулятор представляет собой пластмассовый сосуд, в котором помещены положительные и отрицательные электроды, составленные из отдельных пластин. Отрицательные электроды, изготовленные из пластин окиси цинка, заключены в защитные пакеты из материала, который хорошо пропускает электролит, но задерживает металлические частицы. Положительные пластины изготовлены из серебра.

Для составления аккумуляторной батареи или батареи гальванических элементов несколько элементов соединяют последовательно, т. е. катод первого аккумулятора соединяют с анодом второго, катод второго — с анодом третьего и т. д. Получившиеся таким образом свободные электроды, а именно, анод первого элемента и катод последнего являются соответственно положительным и отрицательным полюсами аккумуляторной батареи.

При определении ЭДС аккумуляторной батареи из  $n$  кислотных аккумуляторов или гальванических элементов с ЭДС одного элемента  $E_0$  и внутренним сопротивлением  $R_0$  ЭДС батареи  $E = nE_0$  и внутреннее сопротивление  $R = nR_0$ .



**Примечание.**

*Последовательное соединение элементов используется для увеличения напряжения.*

Аккумуляторы, как и гальванические элементы, можно включать параллельно, для чего положительные и отрицательные полюсы всех элементов соединяют между собой отдельно. Общие положительный и отрицательный полюсы являются полюсами батареи.

Если батарея состоит из  $m$  параллельно соединенных элементов, то ее ЭДС  $E = E_0$ , а внутреннее сопротивление  $R = R_0/m$ .

**Примечание.**

*Параллельное соединение аккумуляторов и элементов применяют в том случае, если от батареи требуется получить при малом напряжении ток, превышающий допустимый ток одного аккумулятора или элемента.*

Рассмотрим выполнение работ с аккумуляторными батареями.

### **Приведение щелочных аккумуляторных батарей в рабочее состояние**

В качестве электролита для щелочных аккумуляторных батарей пригоден раствор едкого натрия или едкого калия. Электролит, а также твердую щелочь, предназначенную для его приготовления, необходимо хранить в герметически закрытых сосудах.

Смену электролита в аккумуляторных батареях производят не реже одного раза в 3 года, но если емкость батареи заметно снижается, то электролит подлежит смене ранее указанного срока.

Электролит заливают через чистую стеклянную, эбонитовую или фарфоровую воронку.

**Внимание.**

*Металлические воронки применять запрещается, так как это может вызвать короткое замыкание внутри аккумулятора.*

После двухчасовой пропитки проверяют уровень электролита. Установив нормальный уровень электролита, аккумуляторные батареи включают на заряд.

Аккумуляторные батареи, хранившиеся с электролитом не более года, разрешается вводить в эксплуатацию без смены электролита, если он соответствует по плотности условиям работы.

Если же батареи хранили электролитом больше года, то перед вводом в эксплуатацию необходимо сменить электролит.

### **Приготовление электролита для щелочных аккумуляторных батарей**

Для растворения едкого калия или едкого натрия нужна дистиллированная вода. Лишь в крайнем случае ее можно заменить дождевой

водой, собранной с чистой поверхности, или водой от таяния чистого снега.

При пользовании твердыми щелочами берут:

а) для получения электролита плотностью 1,19—1,21 одну весовую часть едкого калия на три весовые части воды;

б) для получения электролита плотностью 1,25—1,27 одну весовую часть едкого калия на две весовые части воды.

Щелочь растворяют в чистой стальной или чугунной посуде.



#### Внимание.

*Запрещается пользоваться оцинкованной, луженой, алюминиевой, медной, керамической и свинцовой посудой, а также посудой, уже применявшейся для приготовления электролита свинцовых аккумуляторных батарей, так как даже **ничтожно малое количество кислоты разрушает щелочные аккумуляторные батареи**. Приготовление электролита для щелочных и кислотных аккумуляторных батарей в одном помещении запрещается.*

Нужное количество воды наливают в сосуд, затем небольшими кусками кладут твердую щелочь и перемешивают ее в воде стеклянной палочкой или стальным прутиком. Приготовленному электролиту дают остыть и отстояться 3—12 ч, после чего сливают осветлившуюся часть, пригодную для заливки в аккумуляторы.

Если применяют жидкую щелочь, ее разбавляют водой до требуемой плотности. Приготовленному раствору дают отстояться и остыть до 30°C.

Составной электролит готовят так: к каждому литру готового раствора едкого калия плотностью 1,19—1,21 прибавляют при тщательном перемешивании 20 г моногидрата лития. В каждый аккумулятор после заливки электролита вливают несколько капель вазелинового масла.

При изготовлении электролита чаще всего пользуются составными щелочами (смесь едкого калия и едкого лития), которые поставляются в герметической посуде в твердом или жидком виде (плотность не менее 1,41).

Порядок приготовления электролита из готовых смесей зависит от того, в каком виде, твердом или жидком концентрированном, находятся щелочи.

При пользовании твердыми смесями на 1 кг калиевой составной щелочи берут 3 л воды, а на 1 кг натриевой составной щелочи — 5 л воды.

Вскрыв банку с твердой щелочью, содержимое ее небольшими порциями (во избежание сильного разогревания) кладут в сосуд с водой, перемешивают.

Все содержимое банки необходимо растворить одновременно.

При пользовании жидким концентратом к 1 л калиевой щелочи плотностью 1,41 добавляют 1 л воды, а к 1 л натриевой щелочи плотностью 1,41 доливают 1,5 л воды.



**Примечание.**

*Плотность калиевого электролита при температуре 25°C должна быть 1,19— 1,21; натриевого составного электролита — 1,17...1,19.*

### Проверка плотности электролита аккумуляторных батарей

Плотность электролита измеряют при помощи денсиметра, который обычно градуируется по плотности от 1,08 до 1,32. Для определения плотности электролита в аккумуляторную банку через горловину крышки опускают свободный конец эбонитовой трубки денсиметра, а затем сжимают его резиновый шар.

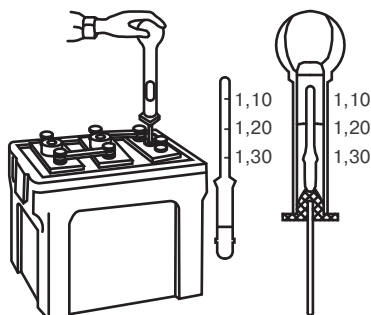
Измерение плотности электролита аккумуляторных батарей представлено на **рис. 2.68**. При отпускании шара в стеклянный сосуд всасывается электролит в количестве, достаточном для того, чтобы в нем мог свободно плавать ареометр.

Плотность электролита определяется глубиной погружения ареометра и указывается цифрой на шкале ареометра, до которой он погружен в электролит.



**Примечание.**

*При замерах необходимо следить, чтобы ареометр не прилипал к стенкам сосуда.*



**Рис. 2.68.** Измерение плотности электролита аккумуляторных батарей



После замеров электролит необходимо вылить обратно в тот же аккумулятор, из которого он взят.

### Проверка уровня электролита аккумуляторных батарей

Электролит должен перекрывать пластины аккумулятора не менее чем на 5 мм и не более чем на 12 мм. Уровень электролита определяют при помощи стеклянной трубки диаметром 5—6 мм с метками по высоте 5 и 12 мм.

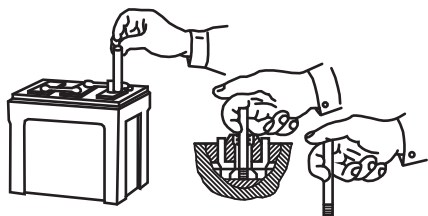


Рис. 2.69. Проверка уровня электролита аккумуляторных батарей

Проверка уровня электролита аккумуляторных батарей (рис. 2.69):

I — пластина;

II — уровень электролита над пластинами.

### Смена электролита щелочных аккумуляторов

Смену электролита необходимо производить в следующем порядке:

- ♦ разрядить аккумуляторную батарею нормальным током в течение 8 ч до 1 В на аккумулятор;
- ♦ вылить старый электролит;
- ♦ промыть аккумуляторы дистиллированной водой;
- ♦ залить аккумуляторы электролитом несколько повышенной плотности (например, 1,22 вместо 1,19), так как она снизится из-за разбавления водой;



#### Внимание.

Эту операцию необходимо выполнить сразу же после предыдущей, поскольку аккумуляторы, промытые дистиллированной водой, запрещается, во избежание коррозии, оставлять без электролита.

- ♦ через 2 ч после заливки аккумуляторов электролитом проверить плотность электролита и довести ее до требуемой нормы;
- ♦ произвести усиленный заряд.

### Заряд и разряд щелочных аккумуляторных батарей

В зависимости от состояния щелочных аккумуляторных батарей применяют следующие виды заряда: нормальный; усиленный; ускоренный; формовочный.

Заряд аккумуляторных батарей по нормальному (основному) режиму производится током нормального режима в течение 7 часов в соответствии с паспортными данными.



**Внимание.**

*При нормальном режиме заряда изменять силу зарядного тока запрещается.*

Величина зарядного тока нормального режима равна току разряда в течение 4 ч. Усиленный заряд производится в течение 6 ч током нормальной величины, а затем в течение 6 ч током, равным половине нормальной величины.

**Усиленный заряд** применяют:

- ♦ при введении в эксплуатацию новых или хранившихся в сухом виде аккумуляторных батарей;
- ♦ при проведении контрольно-тренировочных циклов;
- ♦ при смене электролита;
- ♦ в случае разряда аккумуляторных батарей ниже допустимого разрядного напряжения.



**Примечание.**

*Ускоренный заряд допускается в случае крайней необходимости и производится в течение 2,5 часа током вдвое большим нормальной величины, а затем в течение 2 часов током нормальной величины.*

Формовочный заряд применяют к новым аккумуляторным батареям, подвергшимся переборке и ремонту.

Порядок выполнения формовочного заряда:

- ♦ заряжают аккумуляторные батареи током нормальной величины в течение 6 ч, а затем в течение 6 ч током, равным половине нормальной величины;
- ♦ разряжают батарею в течение 4 ч разрядным током 8-часового режима;
- ♦ производят нормальный заряд.

Никеле-железные аккумуляторные батареи разрешается заряжать током, величина которого меньше нормальной, соответственно уве-

личивая время заряда. Снижать ток более чем вдвое не разрешается (исключение — буферный режим).

Заряжать аккумуляторные батареи необходимо при открытой крышке батарейного ящика и вывернутых пробках. Во время заряда аккумуляторных батарей необходимо следить:

- ♦ за постоянством величины зарядного тока;
- ♦ за температурой электролита, не допуская превышения 45°C для составного электролита, 40°C для раствора едкого натрия и 30°C для раствора едкого калия.

Замер температуры аккумуляторов выполняется стеклянными ртутными термометрами, опускаемыми в электролит.



#### **Совет.**

*После заряда аккумуляторных батарей настоятельно рекомендуется протереть насухо крышки и закрыть вентиляционные пробки, покрыть техническим вазелином или залить парафином.*

Разряд аккумуляторов разрешается производить до напряжения: 1,1 В — в течение 8 часов и более длительном режиме; 1,0 В — в течение 5 ч; 0,8 В — в течение 3 ч; 0,5 В — в течение 1 ч.

### **Контрольно-тренировочный цикл щелочных аккумуляторных батарей**

Если щелочная аккумуляторная батарея длительно не используется (например, батарея аварийного освещения), то она становится «вялой», т. е. при заряде полностью не заряжается, а при разряде не отдает полной емкости.

Для **восстановления** ее работоспособности необходимо провести контрольно-тренировочный цикл.

Порядок цикла:

- ♦ производят усиленный заряд в течение 6 ч током нормальной величины и в течение 6 ч током, равным половине нормального;
- ♦ производят разряд в течение 8 часов током нормального режима до напряжения 1 В на зажимах каждого аккумулятора;
- ♦ производят заряд в течение 6 часов током нормального зарядного режима;
- ♦ производят разряд в течение 8 часов током нормального режима до 1 В на зажимах каждого аккумулятора.

По данным последнего разряда определяют емкость аккумулятора. В процессе разряда через каждый час измеряют напряжение каждого аккумулятора, а при достижении напряжения 1,1 В то же самое определяют через каждые 15 мин.

Как только напряжение на каком-либо аккумуляторе достигнет 1 В, его выводят из разряда досрочно.

Для этого прерывают разряд, отсоединяют междуэлементные соединения выводимого элемента и ставят перемычку, после чего продолжают разряд остальных аккумуляторов.



**Примечание.**

*Аккумуляторы, емкость которых на 20% меньше, чем у остальных, подлежат замене исправными.*

Емкость определяют по выражению  $C = I_{\text{разр}} \times t_{\text{разр}}$ .

Для проведения контрольно-тренировочного цикла требуется специальное оборудование, позволяющее поддерживать постоянной величину разрядного тока.

При отсутствии такого оборудования для устранения «вялости» аккумуляторных батарей следует 2—3 раза разрядить их до напряжения 1 В на аккумулятор с последующим зарядом.

### **Приведение кислотных аккумуляторных батарей в рабочее состояние**

Для приведения кислотных аккумуляторных батарей в рабочее состояние:

- ♦ очистить батареи от пыли и ползучей соли, очистить и смазать вазелином зажимы и междуэлементные соединения;
- ♦ приготовить электролит;
- ♦ вывернуть пробки, снять находящиеся под ними герметизирующие диски и залить элементы электролитом; температура электролита перед заливкой не должна превышать 25°C;
- ♦ через 4—6 ч после заливки электролита измерить напряжение с помощью аккумуляторного пробника, уровень электролита и температуру его во всех аккумуляторах; если слой электролита над предохранительным щитком сепараторов имеет толщину менее 10 мм, необходимо долить электролит; температура его должна быть при этом не выше 30°C;
- ♦ произвести заряд аккумуляторных батарей.

### Приготовление электролита для кислотных аккумуляторных батарей

Для приготовления электролита пригодна только чистая аккумуляторная серная кислота. Использовать техническую серную кислоту запрещается.

Готовят электролит в фарфоровой или эбонитовой посуде, обязательно чисто промытой дистиллированной водой.

Сначала в сосуд наливают дистиллированную воду, а затем тонкой струйкой осторожно льют кислоту, помешивая раствор чистой стеклянной или эбонитовой палочкой.



#### **Внимание.**

*Лить в кислоту воду запрещается.*

Плотность электролита измеряют денсиметром. Она должна быть в пределах  $1,28 \text{ г/см}^3$ .

Приготовленный электролит должен остыть. Электролит вливают в аккумуляторы через стеклянную или эбонитовую воронку.

### Заряд и разряд кислотных аккумуляторных батарей

В зависимости от состояния кислотных аккумуляторных батарей разрешается применять три вида заряда:

- ♦ нормальный (основной);
- ♦ формовочным (первый);
- ♦ контрольно-тренировочный.

**Нормальный заряд** производится током нормального зарядного режима, в соответствии с паспортом аккумуляторных батарей.

При отсутствии паспорта принимают ток, равный току 10-часового режима разряда.

**Формовочный заряд** ведут током, величина которого зависит от типа аккумуляторной батареи и указана в ее паспорте.

Режим заряда должен быть **двухступенчатым**. Заряд током первой ступени ведут до напряжения  $2,4 \text{ В}$  на один аккумулятор. После этого величину тока уменьшают вдвое и доводят заряд до конца.

Заряд кислотной аккумуляторной батареи производят до тех пор, пока не наступит обильное газовыделение («кипение») во всех аккумуляторах, а напряжение и плотность электролита останутся постоянными в течение 3 ч, что служит признаком конца заряда.

Во время заряда кислотных аккумуляторных батарей необходимо вести наблюдение:

- ♦ за величиной зарядного тока;
- ♦ за температурой электролита аккумуляторов, измеряя ее каждый час (в случае если температура достигнет  $45^{\circ}\text{C}$ , зарядный ток необходимо уменьшить вдвое или прекратить заряд до тех пор, пока температура не снизится до  $30^{\circ}\text{C}$ );
- ♦ за плотностью электролита, измеряя ее на второй ступени заряда каждый час;
- ♦ за исправностью вентиляции.

Если в конце заряда плотность превысит норму, то доливают дистиллированную воду, а если плотность окажется ниже нормы, то доливают электролит плотностью  $1,4 \text{ г/см}^3$ .



**Примечание.**

*Кислотные аккумуляторные батареи необходимо заряжать при вынутых пробках.*

У батарей, работающих в «буферном» режиме, а также у стартерных батарей, автоматически подзаряжающихся от генератора, пробки можно не вынимать при условии еженедельной прочистки имеющихся в них вентиляционных отверстий.

После окончания заряда необходимо:

- ♦ протереть все наружные поверхности аккумуляторов;
- ♦ очистить от окислов зажимы и междуэлементные соединения, смазать их тонким слоем технического вазелина;
- ♦ прочистить вентиляционные отверстия;
- ♦ через 3—4 ч (когда окончится газовыделение) завернуть пробки.

Разряд кислотных аккумуляторов допускается до напряжения, указанного в инструкции завода-изготовителя.

### **Контрольно-тренировочный цикл кислотных аккумуляторных батарей**

Если аккумуляторная батарея длительно не разряжается или разряд производится малым током (например, у батареи телефонной связи), то мелкозернистый сульфат свинца переходит в крупнозернистый. Такая аккумуляторная батарея приходит в негодность.

**Примечание.**

*Во избежание этого следует периодически проводить контрольно-тренировочный цикл.*

Порядок цикла:

- ♦ заряжать батареи токами 1-й и 2-й ступени первого заряда до постоянства плотности электролита и напряжения в течение 3 ч;
- ♦ проверять плотность электролита во всех аккумуляторах и корректировать в том случае, если плотность будет отличаться от нормальной;
- ♦ разряжать батареи током 10-часового режима, измеряя напряжения у всех аккумуляторов каждый час, а в конце разряда каждые 30 мин.

**Примечание.**

*Прекращать разряд следует при снижении напряжения хотя бы у одного аккумулятора до 1,7 В.*

- ♦ подсчитать емкость, приведенную к температуре 30°C, по формуле

$$C_{\text{пр}} = C_{\text{ф}} / (1 + 0,009 (T - 30)),$$

где  $C_{\text{пр}}$  — емкость, приведенная к 30°C;

$C_{\text{ф}}$  — емкость, фактически полученная при разряде;

$T$  — средняя температура во время разрядки, °C;

Следует заряжать батареи по нормальному двухступенчатому режиму.

**Совет.**

*Для предотвращения образования крупнозернистого сульфата следует один раз в 3 месяца разряжать аккумуляторную батарею до напряжения 1,7 В на аккумулятор с последующим зарядом.*

Если отсутствует оборудование для поддержания постоянства разрядного тока, контрольно-тренировочный цикл следует проводить в аккумуляторной мастерской для определения пригодности их к эксплуатации. При правильной эксплуатации и систематическом обслуживании аккумуляторных батарей срок службы кислотных аккумуляторов составляет 3—4 года, щелочных аккумуляторов — 10...14 лет при наличии профессионального ухода, 8—9 лет при его отсутствии. Специальных средств по продлению срока службы аккумуляторов не существует.

## 2.9. Вопросы для тестирования

### Вопрос №1.

Сила тока в последних двух цепочках (рис. 2.71) будет:

а) 1,5 А и 2,8 А; б) 1,3 А и 2,6 А; в) 1,1 А и 2,3 А; г) 1,8 А и 2,9 А.

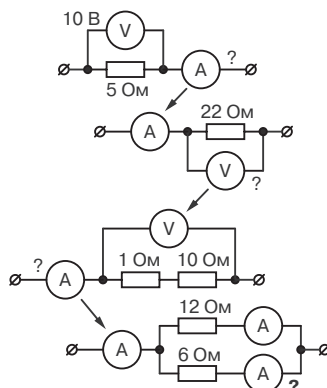


Рис. 2.71. Схема для вопроса №1

### Вопрос №2.

Шесть ламп для карманного фонаря на 3,5 В, включенные в сеть с напряжением 127 В через реостат, обеспечивающий нормальный канал каждой лампы (рис. 2.72). Как изменится канал ламп, если одна из них перегорит?

а) Накал увеличится; б) накал уменьшится; в) все погаснут; г) все сгорят.

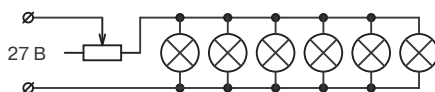


Рис. 2.72. Схема для вопроса №2

### Вопрос №3.

Сила тока в последних двух цепочках (рис. 2.73) будет:

а) 0,6 А и 0,7 А; б) 0,6 А и 0,6 А; в) 0,7 А и 0,7 А; г) 0,5 А и 0,5 А.

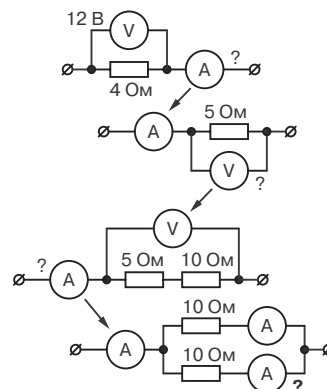


Рис. 2.73. Схема для вопроса №3

### Вопрос №4.

Что будет с лампой для карманного фонаря, присоединенная к точкам А и В, если замкнуть ключ К?

а) Не перегорит; б) перегорит; в) ярко засветится; г) даже не загорится.

### Вопрос №5.

Какое значение покажут идеальные измерительные приборы, если  $U = 10$  В, а  $R = 5$  Ом?

а)  $A = 5$  А;  $V_1 = 5$  В;  $V_2 = 3$  В; б)  $A = 5$  А;  $V_1 = 2$  В;  $V_2 = 5$  В; в)  $A = 1$  А;  $V_1 = 5$  В;  $V_2 = 5$  В; г)  $A = 2$  А;  $V_1 = 2$  В;  $V_2 = 2$  В.

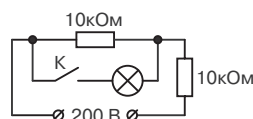


Рис. 2.74. Схема для вопроса №4



**Вопрос №6.**

Какое напряжение показывает вольтметр, если  $U = 200 \text{ В}$ , а сопротивление вольтметра  $10 \text{ кОм}$ ?

- а)  $64 \text{ В}$ ; б)  $89 \text{ В}$ ; в)  $95 \text{ В}$ ; г)  $106 \text{ В}$ .

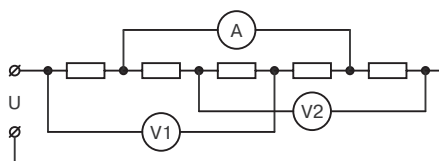


Рис. 2.75. Схема для вопроса №5

**Вопрос №7.**

Какое напряжение показывает вольтметр, если  $U = 12 \text{ В}$ , а сопротивление вольтметра  $200 \text{ Ом}$ ?

- а)  $2 \text{ В}$ ; б)  $3 \text{ В}$ ; в)  $4 \text{ В}$ ; г)  $5 \text{ В}$ .

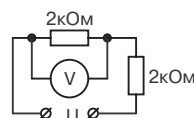


Рис. 2.76. Схема для вопроса №6

**Вопрос №8.**

Определите общее сопротивление электрической цепи.

- а)  $5 \text{ Ом}$ ; б)  $6 \text{ Ом}$ ; в)  $7 \text{ Ом}$ ; г)  $8 \text{ Ом}$ .

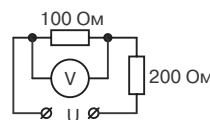


Рис. 2.77. Схема для вопроса №7

**Вопрос №9.**

Сопротивление реостата  $8 \text{ Ом}$ . Движок поставили посередине. Рабочее напряжение лампы  $6 \text{ В}$ . Будет ли гореть лампа нормальным накалом?

- а) Да; б) нет; в) вообще гореть не будет; г) сгорит.

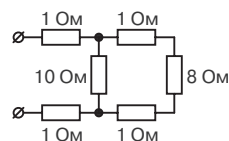


Рис. 2.78. Схема для вопроса №8

**Вопрос №10.**

Комната освещается пятью последовательно соединенными лампами, на каждой из которых написано  $220 \text{ В}$ ,  $25 \text{ Вт}$ . Затем одну из них заменят, на которой написано  $220 \text{ В}$ ,  $40 \text{ Вт}$ . Будет ли одна гореть ярче прежней?

- а) Сгорит; б) будет гореть ярче; в) не будет гореть ярче; г) все лампы не будут гореть.

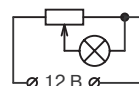


Рис. 2.79. Схема для вопроса №9

**Вопрос №11.**

Когда в настольную лампу вставили лампочку, на которой рассеивается мощность  $P_1 = 60 \text{ Вт}$ , то оказалось, что на соединительных проводах лампы рассеивается мощность  $P_2 = 10 \text{ мВт}$ . Какая мощность будет рассеиваться на соединительных проводах, если поставить лампочку мощностью  $P_3 = 100 \text{ Вт}$ ? Напряжение в сети в обоих случаях считать равным  $U = 220 \text{ В}$ .

- а)  $P_4 = 0,17 \text{ Вт}$ ; б)  $P_4 = 0,027 \text{ Вт}$ ; в)  $P_4 = 0,047 \text{ Вт}$ ; г)  $P_4 = 0,11 \text{ Вт}$ .

**Вопрос №12.**

Два одинаковых вольтметра, соединенных последовательно, при подключении к источнику тока показывают напряжение  $U_1 = 4,5$  В каждый. Если к тому же источнику подключить один вольтметр, он показывает напряжение  $U_2 = 8$  В. Чему равна ЭДС источника?

а)  $E = 11,3$  В; б)  $E = 10,8$  В; в)  $E = 10,3$  В; г)  $E = 11,8$  В.

**Вопрос №13.**

При замкнутом ключе К через первый амперметр  $A_1$  идет ток  $I_1 = 3$  А, а через второй —  $I_2 = 1$  А. Включенные в схему источники одинаковые. Внутреннее сопротивление источников и амперметров много меньше сопротивления резисторов. Какой ток  $I$  будет протекать через амперметр  $A_1$ , если разомкнуть ключ К?

а)  $I = 3,4$  А; б)  $I = 4,1$  А; в)  $I = 4,3$  А; г)  $I = 2,8$  А.

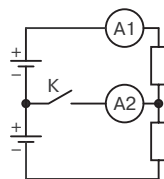


Рис. 2.80. Схема для вопроса №13

**Вопрос №14.**

Цепь собрана из одинаковых резисторов и вольтметров. Первый вольтметр показывает  $U_1 = 4$  В, а третий —  $U_3 = 2$  В. Каково показание второго вольтметра?

а)  $U_2 = 3,6$  В; б)  $U_2 = 2,6$  В; в)  $U_2 = 1,6$  В; г)  $U_2 = 0,6$  В.

**Вопрос №15.**

Мы хотим измерить ЭДС батарейки для наручных часов. У нас есть два самых простых, но исправных вольтметра разных моделей. Подключив первый вольтметр к батарейке, мы получили значение напряжения  $U_1 = 0,9$  В, подключив второй вольтметр —  $U_2 = 0,6$  В. Недоумевая, мы подключили к батарейке оба вольтметра одновременно (параллельно друг другу). Они показали одно и то же напряжение  $U_0 = 0,45$  В. Объясните происходящее и найдите ЭДС батарейки  $E_0$ .

а)  $E_0 = 1,2$  В; б)  $E_0 = 1,4$  В; в)  $E_0 = 1,6$  В; г)  $E_0 = 1,8$  В.

**Вопрос №16.**

Два одинаковых резистора соединили параллельно и подключили к батарее, составленной из двух последовательно включенных одинаковых гальванических элементов. Затем резисторы соединили последовательно и подключили к параллельно соединенным ранее использовавшимся элементам. При этом мощность, выделяющаяся на каждом

резисторе, уменьшилась в  $n = 4$  раза. Найти отношение сопротивления резистора к внутреннему сопротивлению элемента.

а)  $R = 2,5$ ; б)  $R = 1,5$ ; в)  $R = 3,5$ ; г)  $R = 4,5$ .

**Вопрос №17.**

Электрическая лампочка, рассчитанная на напряжение 120 В, имеет мощность 40 Вт. Какое добавочное сопротивление нужно включить последовательно с лампой, чтобы она нормально горела при напряжении 220 В?

а) 300 Ом; б) 250 Ом; в) 200 Ом; г) 100 Ом.

**Вопрос №18.**

Падение напряжения во внешней цепи равно  $U = 5,1$  В. Определить ток в цепи, ЭДС и КПД источника тока, если его внутреннее сопротивление  $r = 1,5$  Ом, а сопротивление цепи  $R = 8$  Ом.

а)  $I = 0,7375$ ; КПД = 0,74;  $E = 5$ ; б)  $I = 0,6375$ ; КПД = 0,84;  $E = 6$ ;  
в)  $I = 0,7375$ ; КПД = 0,64;  $E = 7$ ; г)  $I = 0,5375$ ; КПД = 0,94;  $E = 4$ .

**Вопрос №19.**

Потери мощности в линии электропередач составляют  $k_1 = 5\%$  от мощности, получаемой потребителем. Во сколько раз нужно изменить напряжение на входе линии и сопротивление потребителя для того, чтобы при той же мощности, получаемой потребителем, потери в линии снизить до  $k_2 = 1\%$ ?

а) в 2,84 раза; б) в 2,46 раза; в) в 2,24 раза; г) в 2,35 раза.

**Вопрос №20.**

Лабораторная электроплитка, сопротивление спирали которой  $R = 20$  Ом, включена в сеть последовательно с резистором, сопротивление которого  $R_0 = 10$  Ом. При длительной работе плитка нагрелась от комнатной температуры  $t_0 = 20^\circ\text{C}$  до температуры  $t_1 = 52^\circ\text{C}$ . До какой температуры нагреется плитка, если параллельно ей включить еще одну такую же плитку?

а)  $t_x = 38^\circ\text{C}$ ; б)  $t_x = 25^\circ\text{C}$ ; в)  $t_x = 56^\circ\text{C}$ ; г)  $t_x = 42^\circ\text{C}$ .

## А ТЕПЕРЬ ПОЗНАКОМИМСЯ С МАГНИТНЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ



*Сделав ТРЕТИЙ шаг, вы познакомитесь с магнетизмом. Рассмотрите такие вопросы: магниты и их свойства, напряженность магнитного тока, закон полного тока, взаимодействие проводников с токами, гистерезис, электромагниты. Освойте вихревые токи, самоиндукцию, энергию магнитного поля, расчет индуктивности, взаимоиндукцию. И в завершении — ответите на вопросы для самоконтроля.*

### 3.1. Магниты и их свойства

#### Первое знакомство



##### Определение.

**Магнетизм** — это особое проявление движения электрических зарядов внутри атомов и молекул, которое проявляется в том, что некоторые тела способны притягивать к себе и удерживать частицы железа, никеля и других металлов. Эти тела называются **магнитными**.

Стрелка компаса, являющаяся магнитом, устанавливается в магнитном поле Земли так, что один конец ее указывает направление на север и называется северным полюсом (N), а противоположный конец — южным полюсом (S).

В зависимости от назначения магнитам придают различную форму: прямоугольную, ромбическую, круглую и т. д. Магнит любой формы имеет два полюса — северный и южный.

Если намагниченный стержень погрузить в железные опилки и затем вынуть, то наибольшее количество опилок окажется притянутым к концам магнита, а в средней части, называемой **нейтральной линией**, опилок не будет.

Если намагниченный стержень разделить на две части, то образуются два магнита с двумя разноименными полюсами на концах.

При дальнейшем дроблении на части намагниченного стержня будут получаться отдельные магниты с северным и южным полюсами на концах.



#### **Вывод.**

*Таким образом, получить магнит с каким-либо одним полюсом (N или S) невозможно.*

Если, недалеко от северного N (или южного S) полюса какого-либо магнита поместить стальной брусок, то он приобретает свойство притягивать железные предметы. При этом ближайший к полюсу N магнита конец бруска будет южным полюсом S, а противоположный — северным N.

При расположении двух магнитов на некотором расстоянии один от другого между их полюсами возникает сила взаимодействия, направленная так, что одноименные полюсы взаимно отталкиваются, а разноименные притягиваются.

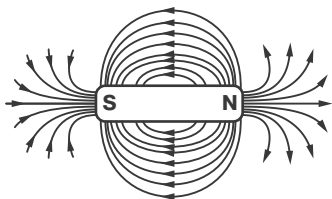


Рис. 3.1. Магнитное поле

Вокруг всякого намагниченного тела возникает магнитное поле, являющееся материальной средой, в которой обнаруживается действие магнитных сил. На рис. 3.1 магнитное поле изображается в виде **магнитных линий**, направленных от северного полюса к южному.



#### **Примечание.**

*Любая магнитная линия не имеет ни конца, ни начала и представляет собой замкнутую кривую, так как северный и южный полюсы магнита неотделимы один от другого.*

При внесении в магнитное поле какого-либо тела оно пронизывается магнитными линиями, которые определенным образом воздей-

ствуют на поле. При этом различные материалы по-разному воздействуют на магнитное поле.

В намагниченных телах магнитное поле создается при движении электронов, вращающихся вокруг ядра атома и вокруг собственной оси. Орбиты и оси вращения электронов в атомах могут находиться в различных положениях один относительно другого, так что в различных положениях находятся магнитные поля, возбуждаемые движущимися электронами.

В зависимости от взаимного расположения магнитных полей они могут складываться или вычитаться. В первом случае атом будет обладать магнитным полем или магнитным моментом, а во втором — не будет.

**Определение.**

*Материалы, атомы которых не имеют магнитного момента, и намагнитить которые невозможно, называются **диамагнитными**.*

К ним относится абсолютное большинство веществ, встречающихся в природе, и некоторые металлы (медь, свинец, цинк, серебро и другие).

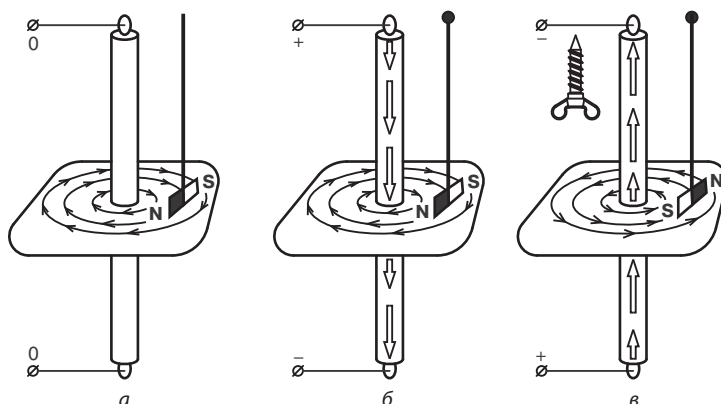
Материалы, атомы которых обладают некоторым магнитным моментом и могут намагничиваться, называются парамагнитными. К ним относятся алюминий, олово, марганец и др.

Исключение составляют ферромагнитные материалы, атомы которых обладают большим магнитным моментом и которые легко поддаются намагничиванию. К таким материалам относятся железо, сталь, чугун, никель, кобальт, гадолиний и их сплавы.

### Магнитное поле электрического тока

Вокруг проводника с током образуется магнитное поле, так что свободно вращающаяся магнитная стрелка, помещенная вблизи проводника, будет стремиться занять положение, перпендикулярное плоскости, проходящей вдоль него. В этом легко убедиться, проделав следующий опыт.

В отверстие горизонтально положенного листа картона вставляют прямолинейный проводник (рис. 3.2, а) и пропускают через него ток. Насыпают на картон железные опилки и убеждаются в том, что они располагаются концентрическими окружностями, имеющими общий центр в точке пересечения проводником картонного листа.



**Рис. 3.2.** Проводник и картон с железными опилками:  
а — без прохождения тока; б — в одном направлении; в — в обратном направлении

Магнитная стрелка, подвешенная на нити вблизи этого проводника, займет положение, указанное на **рис. 3.2, б**. При изменении направления тока в проводнике магнитная стрелка повернется на угол  $180^\circ$ , оставаясь в положении, перпендикулярном плоскости, проходящей вдоль проводника (**рис. 3.2, в**).

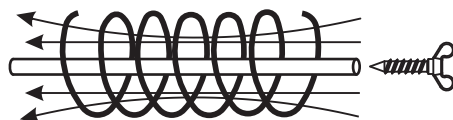
В зависимости от направления тока в проводнике направление магнитных линий образуемого им магнитного поля определяется правилом буравчика, которое формулируется следующим образом.



#### Правило буравчика.

Если поступательное движение буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то вращательное движение его рукоятки указывает направление магнитных линий поля, образующегося вокруг этого проводника.

Если по проволоке, согнутой в виде кольца, пропустить ток, то под действием его также возникнет магнитное поле.



**Рис. 3.3.** Магнитное поле соленоида

Проволока, согнутая спирально и состоящая из нескольких витков, расположенных так, что оси их совпадают, называется соленоидом (**рис. 3.3**).

#### Магнитное поле соленоида

При прохождении тока через обмотку соленоида или один виток проволоки возбуждается магнитное поле. Направление этого поля также определяется правилом буравчика.



### Правило.

*Если расположить ось буравчика перпендикулярно плоскости кольцевого проводника или вдоль оси соленоида и вращать его рукоятку по направлению тока, то поступательное движение этого буравчика укажет направление магнитных линий поля кольца или соленоида.*

Магнитное поле, возбужденное током обмотки соленоида, подобно магнитному полю постоянного магнита, т. е. конец соленоида, из которого выходят магнитные линии, является его северным полюсом, а противоположный конец — южным.

Направление магнитного поля зависит от направления тока и при изменении направления тока в прямолинейном проводнике или в катушке изменится также направление магнитных линий поля, возбуждаемого этим током.

В однородном магнитном поле во всех точках поле имеет одинаковое направление и одинаковую интенсивность. В противном случае поле называется **неоднородным**.

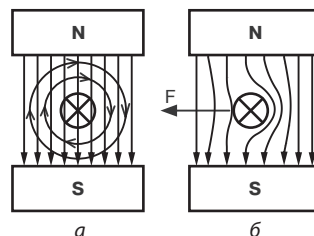
Графически однородное магнитное поле изображают параллельными линиями с одинаковой плотностью, например, в воздушном зазоре между двумя разноименными параллельно расположенными полюсами магнита.

### Проводник с током в магнитном поле. Магнитная индукция

Если проводник, по которому проходит электрический ток, внести в магнитное поле, то в результате взаимодействия магнитного поля и проводника с током проводник будет перемещаться в ту или иную сторону.

Направление перемещения проводника зависит от направления тока в нем и от направления магнитных линий поля (рис. 3.4, а).

Допустим, что в магнитном поле магнита NS находится проводник, расположенный перпендикулярно плоскости рисунка; по проводнику протекает ток в направлении от нас за плоскость рис. 3.4.



**Рис. 3.4.** Движение проводника с током в магнитном поле:

а — магнитное поле полюсов и тока проводника;

б — результирующее магнитное поле





### Примечание.

Ток, идущий от плоскости рисунка к наблюдателю, обозначается условно **точкой**, а ток, направляющийся за плоскость рисунка от наблюдателя, — **крестом**. Всегда все уходящее на изображениях обозначается крестом, а направленное на «смотрящего» — точкой.

Под действием тока вокруг проводника образуется свое магнитное поле. Применяя правило буравчика, легко убедиться, что в рассматриваемом нами случае направление магнитных линий этого поля совпадает с направлением движения часовой стрелки.

При взаимодействии магнитного поля магнита и поля, созданного током, образуется результирующее магнитное поле, изображенное на рис. 3.4, б.

Густота магнитных линий результирующего поля с обеих сторон проводника различна. Справа от проводника магнитные поля, имея одинаковое направление, складываются, а слева, будучи, направленными встречно, частично взаимно уничтожаются.

Следовательно, на проводник будет действовать сила, большая справа и меньшая слева. Под действием большей силы проводник будет перемещаться по направлению силы  $F$ .

Перемена направления тока в проводнике изменит направление магнитных линий вокруг него, вследствие чего изменится и направление перемещения проводника.

Для определения направления движения проводника в магнитном поле можно пользоваться **правилом левой руки** (рис. 3.5), которое формулируется следующим образом.

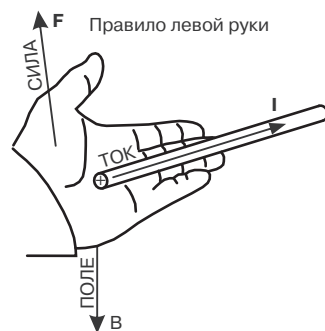


Рис. 3.5. Правило левой руки



### Правило.

Если расположить левую руку так, чтобы магнитные линии пронизывали ладонь, а вытянутые четыре пальца указывали направление тока в проводнике, то отогнутый большой палец укажет направление движения проводника.

Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, зависит как от тока в проводнике, так и от интенсивности магнитного поля.

Основной величиной, характеризующей интенсивность магнитного поля, является **магнитная индукция  $B$** . Единицей измерения магнитной индукции является **тесла** ( $\text{Тл} = \text{Вс}/\text{м}^2$ ).

О магнитной индукции можно судить по силе действия магнитного поля на проводник с током, помещенный в это поле. Если на проводник длиной 1 м и с током 1 А, расположенный перпендикулярно магнитным линиям в равномерном магнитном поле, действует сила в 1 Н (ньютон), то магнитная индукция такого поля равна 1 Тл (тесла).



**Примечание.**

*Магнитная индукция является векторной величиной, ее направление совпадает с направлением магнитных линий, причем в каждой точке поля вектор магнитной индукции направлен по касательной к магнитной линии.*

Сила  $F$ , действующая на проводник с током в магнитном поле, пропорциональна магнитной индукции  $B$ , току в проводнике  $I$  и длине проводника  $l$ , т. е.  $F = BIl$ .

Эта формула верна лишь в том случае, когда проводник с током расположен перпендикулярно магнитным линиям равномерного магнитного поля.

Если проводник с током находится в магнитном поле под каким-либо углом  $\alpha$ , по отношению к магнитным линиям, то сила равна:  $F = BIl \sin \alpha$ .

Если проводник расположить вдоль магнитных линий, то сила  $F$  станет равной нулю, так как  $\alpha = 0$ .

## 3.2. Напряженность магнитного тока.

### Закон полного тока

#### Магнитодвижущая сила

Свойство тока возбуждать магнитное поле характеризуется **магнитодвижущей силой** (МДС), обозначаемой буквой  $F$ . Магнитодвижущая сила распределяется вдоль замкнутой магнитной линии и равна току, создающему магнитное поле, и измеряется в амперах, как и ток.

Намагничивающая сила прямолинейного проводника с током  $I$  равна этому току, т. е.  $F = I$ .

Для возбуждения более сильного поля ток пропускают по катушке с числом витков  $\omega$ , и так как каждый виток катушки обладает намагничивающей силой  $F$ , то намагничивающая сила катушки  $F = \omega I$  ампер (часто говорят «ампер-витков»).

### Напряженность магнитного поля

Магнитодвижущая сила, приходящаяся на единицу длины магнитной линии, называется напряженностью магнитного поля, обозначается буквой  $H = F/l$ , где  $l$  — длина магнитной линии. Измеряется в амперах на метр (А/м) или чаще в единицах в 100 раз больших ( $1 \text{ А/см} = 100 \text{ А/м}$ ).



#### Примечание.

*Напряженность магнитного поля, также как и магнитная индукция, является **векторной** величиной.*

В изотропной среде (с одинаковыми магнитными свойствами во всех направлениях) вектор напряженности магнитного поля совпадает с направлением магнитной линии в данной точке.

Если физические условия вдоль всей длины магнитной линии одинаковы, то определение напряженности поля очень просто.

В частности, вокруг прямолинейного проводника линии магнитного поля представляют собой окружности (см. ранее **рис. 3.2**), длина каждой из которых  $l = 2\pi x$ , где  $x$  — радиус окружности с центром на оси проводника, проведенный через рассматриваемую точку поля.

Условия во всех точках выбранной окружности одинаковы и напряженность поля  $H = I/2\pi x$ , где  $\pi = 3,14$ , т. е. по мере удаления от проводника напряженность поля уменьшается.

Это выражение можно записать в виде  $I = Hl = H2\pi x$ .

Если магнитное поле создано не одним, а  $w$  проводниками с током  $I$ , то магнитодвижущая сила

$$\sum I = F = Iw = Hl = H2\pi x.$$

Таким образом, магнитодвижущая сила вдоль контура равна полному току, пронизывающему поверхность, ограниченную этим контуром. Полученное соотношение называется **законом полного тока**.

Если простейший контур длиной  $l = 2\pi x$  пронизывается  $n$  проводами с токами  $I_1$  одного направления и  $m$  проводами с токами  $I_2$  противоположного направления, то закон полного тока принимает следующий вид:

$$F = nI_1 - mI_2 = NI = H2\pi x.$$

В большинстве электротехнических устройств напряженность магнитного поля вдоль магнитной линии изменяется в зависимости от материала и сечения участков, через которые она проходит. В этом случае магнитная линия делится на  $K$  участков, в пределах каждого из которых напряженность магнитного поля можно считать постоянной.

Если магнитное поле возбуждается током  $I$ , проходящим по катушке с числом витков  $\omega$ , то закон полного тока для таких устройств будет иметь следующую общую формулу:

$$\sum I = \omega I = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_K l_K,$$

т. е. намагничивающая сила равна сумме произведений напряженности поля на длину соответствующих участков магнитной цепи.

В приведенной общей форме закон полного тока широко используется для расчета магнитных полей электрических машин и аппаратов.

### Магнитная проницаемость. Магнитный поток

Магнитная индукция, как и напряженность магнитного поля,— векторная величина, причем в подавляющем большинстве случаев векторы магнитной индукции и напряженности имеют одинаковое направление.

Между магнитной индукцией и напряженностью поля существует прямая пропорциональность, т. е.

$$B = \mu_a H,$$

где  $\mu_a$ — абсолютная магнитная проницаемость.

**Абсолютная магнитная проницаемость**, равная отношению магнитной индукции к напряженности магнитного поля, имеет размерность генри/метр ( $\text{Гн/м} = \text{Вс/Ам}$ ) и для вакуума равна  $4\pi 10^{-7} \text{ Гн/м}$ .

Эта величина называется **магнитной постоянной**  $\mu_0$ .



### Определение.

Число, показывающее, во сколько раз абсолютная магнитная проницаемость  $\mu_a$  данной среды больше магнитной постоянной  $\mu_0$ , называется **относительной магнитной проницаемостью**  $\mu_r$  или сокращенно **магнитной проницаемостью**, т. е.  $\mu_r = \mu_a / \mu_0$ .

Для воздуха магнитная проницаемость  $\mu_r$  принимается равной единице, как и для всех тел, кроме ферромагнитных.

Что же касается ферромагнитных тел, то для них магнитная проницаемость значительно больше единицы и является для одного и того же материала величиной не постоянной, а зависящей от магнитного состояния этого материала, т. е. от магнитной индукции ферромагнитного тела, подвергнутого намагничиванию.

Для характеристики магнитных свойств ферромагнитных материалов служит зависимость между **B** и **H**, изображенная графически в виде кривой, называемой **кривой намагничивания**.

Для получения кривой намагничивания какого-либо материала строят график, по горизонтальной оси которого откладывают величины напряженности поля, а по вертикальной — величины магнитной индукции испытуемого материала.



### Определение.

Произведение магнитной индукции на величину какой-либо поверхности в магнитном поле, расположенной перпендикулярно направлению магнитных линий, называется **магнитным потоком**, пронизывающим эту поверхность.

Таким образом, обозначив магнитный поток буквой **Φ**, получим  $\Phi = BS$ , где **S** — площадь поверхности, пронизываемой магнитным потоком.

Если магнитная индукция **B** выражена в теслах, а площадь поверхности **S** — в квадратных метрах, то магнитный поток выражается в веберах (**Вб**), т. е.  $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Т} \times 1 \text{ м}^2$ .

Например, если перпендикулярную магнитным линиям площадку в  $0,5 \text{ м}^2$  пронизывает магнитный поток  $\Phi = 1 \text{ Вб}$ , то магнитная индукция

$$B = 1/0,5 = 2 \text{ Тл.}$$

### 3.3. Взаимодействие проводников с токами. Гистерезис

#### Магнитные поля вокруг проводников

Если два или несколько проводников, по которым проходят электрические токи, расположить параллельно, то эти проводники в зависимости от направлений токов в них будут взаимно притягиваться или отталкиваться.

Такое взаимодействие между проводниками происходит в результате возникновения магнитного поля вокруг каждого из проводников с током.

Представим себе два проводника *аб* и *вг*, по которым проходят токи противоположных направлений (рис. 3.6). Вокруг проводников имеются магнитные поля. Согласно правилу буравчика магнитные линии этих полей направлены так, как указано в нижней части рис. 3.6.

Если смотреть сверху вдоль проводников, то вокруг проводника *аб* магнитные линии направлены по часовой стрелке, а вокруг проводника *вг* — против часовой стрелки.

Таким образом, эти линии в пространстве между проводниками имеют одинаковые направления, и проводники будут взаимно отталкиваться подобно тому, как взаимно отталкиваются одноименные полюсы магнитов.

Если через те же проводники пропустить токи одинаковых направлений (рис. 3.7), то линии магнитных полей, возникающих вокруг проводников, в пространстве между проводниками получат направление в противоположные стороны, поэтому проводники будут взаимно притягиваться.

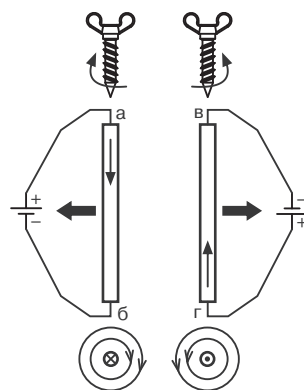


Рис. 3.6. Проводники *аб* и *вг*, по которым проходят токи противоположных направлений

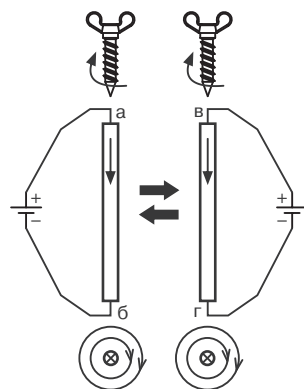


Рис. 3.7. Проводники *аб* и *вг*, по которым проходят токи в одном направлении

## Абсолютная магнитная проницаемость



### Определение.

Сила взаимодействия между проводниками, по которым протекают токи, прямо пропорциональна произведению этих токов  $I_1$  и  $I_2$ , абсолютной магнитной проницаемости  $\mu_a$ .

А также длине  $l$  (длине сближения), на протяжении которой проводники идут параллельно, и обратно пропорциональна расстоянию между проводниками  $a$ , т. е.

$$F = \mu_a \times I_1 \times I_2 \times l / 2\pi a.$$

Если провода находятся в немагнитной среде, т. е.

$$\mu_a = \mu_0 = 4\pi 10^{-7} \times \text{В} \times \text{с} / \text{А} \times \text{м},$$

то сила взаимодействия между проводниками

$$F = 2 \times I_1 \times I_2 \times l / a 10^{-7} \text{ Н}.$$

Начальная кривая намагничивания определяет соотношения между магнитной индукцией и напряженностью  $B$  и  $H$  лишь для ферромагнитного материала, который не подвергался намагничиванию.

## Электромагнит



### Определение.

Соленоид, содержащий железный сердечник, называется **электромагнитом**.

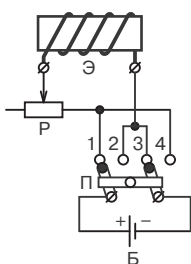


Рис. 3.8. Схема намагничивания стального сердечника

Если цепь (рис. 3.8), состоящая из источника тока  $B$  (например, из аккумуляторной батареи), переключателя  $P$  на два положения (1-2 и 3-4), реостата  $R$  и электромагнита  $\mathcal{E}$ , разомкнута, то тока в обмотке электромагнита  $\mathcal{E}$  нет.

Установим переключатель  $P$  на контакты 1-2 и введем полностью сопротивление реостата. При этом в цепи появится небольшой ток и проходить он будет в следующем направлении: плюс батареи  $B$ , контакт 1, реостат  $R$ , обмотка электромагнита  $\mathcal{E}$ , контакт 2, минус батареи  $B$ .

В соответствии с величиной этого тока в электромагните возникнет магнитное поле с некоторой напряженностью  $H_a$  и магнитной индукцией  $B_a$ .

Применив правило буравчика, найдем, что магнитный поток в сердечнике электромагнита направлен справа налево, т. е. левый конец сердечника является северным, а правый — южным полюсом электромагнита Э.

Отложим на горизонтальной оси (создадим график) в масштабе значение напряженности поля  $H_a$ , а на вертикальной — значение  $B_a$ .

Восстановив перпендикуляры из точек отложенных значений на горизонтальной и вертикальной осях, получим точку пересечения *а*, которая определит первую точку кривой первоначального намагничивания сердечника электромагнита.

Перемещая движок реостата *Р* вниз, будем уменьшать его сопротивление, вследствие чего увеличится как ток в обмотке электромагнита, так и напряженность магнитного поля.

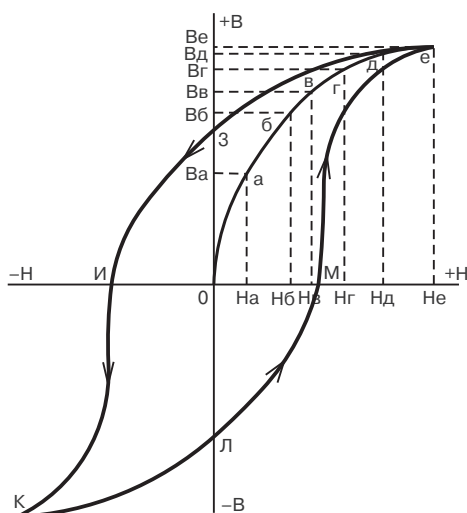


Рис. 3.9. Петля гистерезиса

### Явление гистерезиса

Построив указанным выше способом точки *б*, *в*, *г*, *д* и соединив их между собой, получим кривую первоначального намагничивания сердечника.

Эта кривая показывает, что магнитная индукция в начале намагничивания увеличивается пропорционально напряженности поля (участок *0-а*), затем рост ее замедляется, кривая делает перегиб (точка *б*) и снова приближается к прямолинейной, но уже с небольшим наклоном к горизонтальной оси.

На данном последнем участке увеличение напряженности поля вызывает малый рост магнитной индукции, и дальнейший перевод движка реостата *Р* практически не дает повышения магнитной индукции в сердечнике электромагнита. В этом случае говорят, что сердечник достиг магнитного насыщения.



С уменьшением напряженности намагничивающего поля электромагнита магнитная индукция железного сердечника также начинает уменьшаться, но остается несколько большей, чем в процессе намагничивания, при одних и тех же значениях напряженности.

При размыкании цепи ток в электромагните прекратится, а индукция все же будет иметь некоторое значение, определяемое отрезком 0-з (рис. 3.9).

Это указывает на то, что в сердечнике сохранился некоторый остаточный магнетизм. Если дальнейшее размагничивание прекратить, то железный сердечник окажется искусственным (постоянным) магнитом и будет обладать остаточной магнитной индукцией.



#### **Определение.**

*Рассмотренное нами отставание уменьшения магнитной индукции от уменьшения напряженности магнитного поля называется гистерезисом.*

Чтобы железный сердечник не имел остаточного магнетизма, необходимо подвергнуть его перемагничиванию, т. е. намагничиванию в обратном направлении.

Для этого нужно переключатель П (рис. 3.8) перевести на контакты 3-4.

При таком положении переключателя в обмотке электромагнита возникает ток противоположного направления, а именно:

*плюс батареи Б, контакт 3, обмотка электромагнита Э, реостат Р, контакт 4, минус батареи Б.*



#### **Примечание.**

*Согласно правилу буравчика под действием этого тока в электромагните возникает магнитное поле, направленное слева направо, т. е. противоположно магнитному потоку остаточного магнетизма, которое будет размагничивать сердечник.*

### **Коэрцитивная сила**

Постепенно передвигая движок реостата, достигнем положения, при котором напряженность магнитного поля электромагнита представит собой величину, определяемую отрезком 0-и (рис. 3.9). Такому значению напряженности будет соответствовать магнитная индукция

в сердечнике электромагнита, равная нулю, т. е. сердечник перестанет быть магнитом.

**Определение.**

*Значение напряженности поля, при котором сердечник размагничивается, называется **коэрцитивной (задерживающей) силой**.*

### Петля гистерезиса

Провести полный цикл перемагничивания можно так:

- ♦ уменьшить ток в обмотке электромагнита от какого-то наибольшего значения до нуля;
- ♦ изменив направление тока, увеличить его до начальной наибольшей величины;
- ♦ после этого опять уменьшить до нуля;
- ♦ затем вторично, переменив направление, довести его до начальной величины;

При этом значения магнитной индукции будут изменяться по кривой, называемой **петлей гистерезиса**.

При перемагничивании на преодоление трения между молекулярными магнетиками расходуется некоторое количество энергии, носящее название **потерь на гистерезис**.

Эта энергия, превращаясь в тепло, нагревает перемагничиваемые ферромагнитные материалы (части аппаратов).

### Особенности ферромагнитных материалов

Ферромагнитные материалы имеют большую магнитную проницаемость и обладают **свойством намагничиваться**, что объясняется следующим.

Непрерывное движение электронов в любом веществе можно рассматривать как внутримолекулярные токи, возбуждающие магнитное поле.

Поскольку электроны не только движутся вокруг ядра, но и вращаются вокруг собственной оси, возникает также магнитное поле, вызванное вращением электронов. Причем это магнитное поле значительно сильнее поля, вызванного движением электронов вокруг ядра.

**В неферромагнитных веществах** магнитные поля, вызванные вращением электронов вокруг собственной оси, в каждом атоме взаимно уравниваются, и тело не обладает свойством намагничиваться.

В ферромагнитных материалах магнитные поля, образованные вращательным движением электронов, не уравновешены благодаря особому строению атомов.

Под действием этих полей в теле возникают намагниченные области, подобные мельчайшим магнетикам.

При отсутствии внешнего магнитного поля магнетики расположены беспорядочно и ферромагнитное тело не проявляет магнитных свойств.

При намагничивании железного сердечника некоторые магнетики под действием напряженности намагничивающего поля начинают поворачиваться так, что северные полюсы их постепенно обращаются в одну сторону, а южные — в другую, затем с увеличением напряженности намагничивающего поля поворачиваются и остальные молекулярные магнетики.

В железном сердечнике, доведенном до магнитного насыщения, молекулярные магнетики расположены так, как это видно на рис. 3.10.

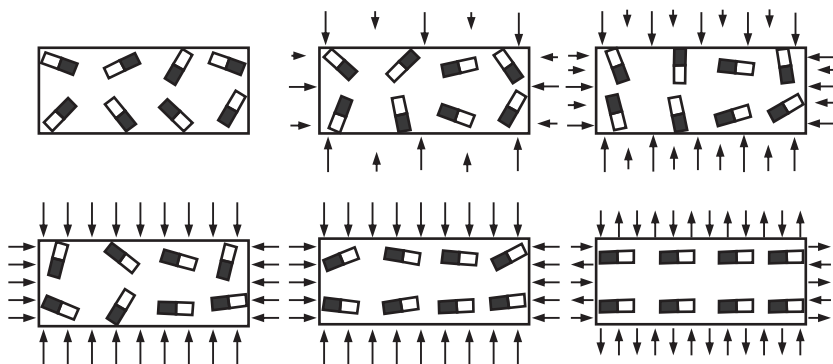


Рис. 3.10. Намагничивание железного сердечника

### 3.4. Электромагниты. Вихревые токи

#### Полярность электромагнита

Свойство электрического тока создавать магнитное поле широко используется на практике. Железный или стальной стержень, помещенный внутрь соленоида, при пропускании тока по соленоиду приобретает магнитные свойства.

Стержень магнитотвердой стали вследствие большой величины коэрцитивной силы, свойственной этому материалу, в значительной мере сохраняет магнитные свойства после исчезновения тока.

Полярность электромагнита можно определить по **правилу буравчика**, приведенному ниже.



### Правило.

*Северный полюс электромагнита находится с той его стороны, где ток для наблюдателя, смотрящего на конец электромагнита, идет против часовой стрелки, а южный — где направление тока совпадает с направлением движения часовой стрелки.*

В устройствах электроники и связи часто применяют поляризованные электромагниты, у которых либо сердечник, либо якорь, либо оба вместе представляют собой магниты.

Неполяризованный электромагнит притягивает свой якорь независимо от направления, посылаемого в его обмотку тока. Работа же поляризованного электромагнита зависит от направления тока в его обмотке.

Так, например, в прямом поляризованном электромагните ток одного направления усиливает магнитное поле его сердечника, а другого — ослабляет.

Электромагниты нашли широкое применение в подъемных и тормозных устройствах, для закрепления в станках стальных обрабатываемых деталей, в электроавтоматах, реле и других устройствах.

## Электромагнитная индукция

Представим себе два параллельных проводника **аб** и **вг**, расположенных на близком расстоянии один от другого (рис. 3.11). Проводник **аб** подключен к зажимам батареи **Б**; цепь включается ключом **К**, при замыкании которого по проводнику проходит ток в направлении от **а** к **б**. К концам же проводника **вг** присоединен чувствительный амперметр **А**, по отклонению стрелки которого судят о наличии тока в этом проводнике.

Если в собранной таким образом схеме замкнуть ключ **К**, то в момент замыкания цепи (рис. 3.12, а) стрелка амперметра отклонится,

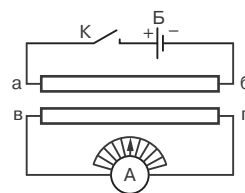
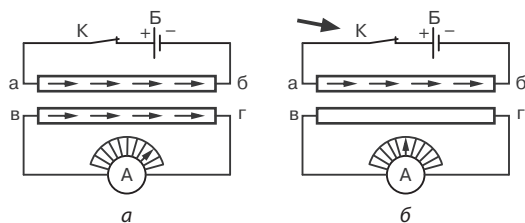
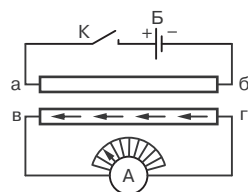


Рис. 3.11. Цепь разомкнута



**Рис. 3.12. Цепь замкнута:**  
а — начальный момент замыкания цепи;  
б — замкнутое состояние цепи



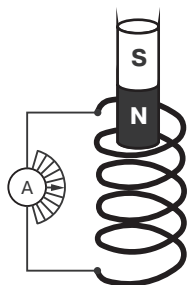
**Рис. 3.13. Момент размыкания цепи**

свидетельствуя о наличии тока в проводнике *вг*; по прошествии же небольшого промежутка времени (долей секунды) стрелка амперметра придет в исходное (нулевое) положение (рис. 3.12, б).

Размыкание ключа *К* опять вызовет кратковременное отклонение стрелки амперметра, но уже в другую сторону, что будет указывать на возникновение тока противоположного направления (рис. 3.13).

Подобное отклонение стрелки амперметра *А* можно наблюдать и в том случае, если, замкнув ключ *К*, приближать проводник *аб* к проводнику *вг* или удалять от него.

Приближение проводника *аб* к *вг* вызовет отклонение стрелки амперметра в ту же сторону, что и при замыкании ключа *К*, удаление проводника *аб* от проводника *вг* повлечет за собой отклонение стрелки амперметра, аналогичное отклонению при размыкании ключа *К*.



**Рис. 3.14. Соленоид**

При неподвижных проводниках и замкнутом ключе *К* ток в проводнике *вг* можно вызвать изменением величины тока в проводнике *аб*.

Аналогичные явления происходят и в том случае, если проводник, питаемый током, заменить магнитом или электромагнитом.

Так, например, на рис. 3.14 схематически изображена катушка (соленоид) из изолированной проволоки, к концам которой подключен амперметр *А*.

Если внутрь обмотки быстро ввести постоянный магнит (или электромагнит), то в момент его введения стрелка амперметра *А* отклонится (рис. 3.15). При выведении магнита будет также наблюдаться отклонение стрелки амперметра, но в другую сторону (рис. 3.16).



### Примечание.

Электрические токи, возникающие при подобных обстоятельствах, называются **индукционными**, а причина, вызывающая появление индукционных токов, электродвижущей силой индукции.

Эта ЭДС возникает в проводниках под действием изменяющихся магнитных полей, в которых находятся эти проводники.

Направление ЭДС индукции в проводнике, перемещающемся в магнитном поле, может быть определено **по правилу правой руки**, которое формулируется так.



### Правило правой руки.

Если правую руку расположить ладонью к северному полюсу так, чтобы большой отогнутый палец показывал направление движения проводника, то четыре пальца будут указывать направление ЭДС индукции (рис. 3.17).

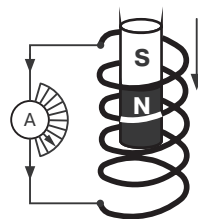


Рис. 3.15. Момент введения постоянного магнита

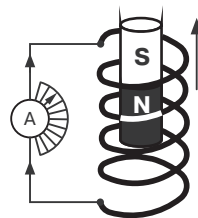


Рис. 3.16. Момент выведения постоянного магнита

Направление индукционного тока, а следовательно, и ЭДС индукции определяют также **по правилу Ленца**, которое формулируется следующим образом.



### Правило Ленца.

ЭДС индукции имеет всегда такое направление, что созданный ею индукционный ток препятствует причине, ее вызывающей. Величина ЭДС индукции, возникающей в замкнутом проводнике, пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего контур этого проводника.

Таким образом, если магнитный поток, пронизывающий контур замкнутого проводника, уменьшился на величину  $\Delta\Phi$  в

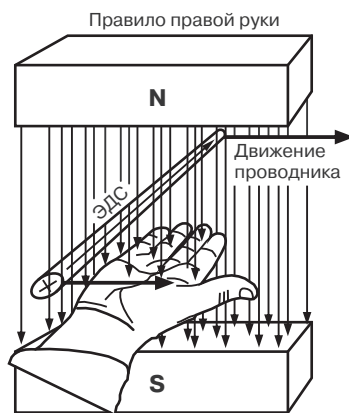


Рис. 3.17. Правило правой руки

течение  $\Delta t$  секунд, то скорость уменьшения магнитного потока равна  $\Delta\Phi/\Delta t$ .

Это отношение и представляет собой величину ЭДС индукции  $\epsilon$ , т. е.  $\epsilon = -\Delta\Phi/\Delta t$ .



### Примечание.

*Знак минус указывает на то, что ток, созданный ЭДС индукции, препятствует причине, вызвавшей эту ЭДС.*

Возникновение ЭДС индукции в замкнутом контуре происходит как при движении этого контура в магнитном поле, так и при изменении магнитного потока, пронизывающего неподвижный контур.

Если контур имеет  $\omega$  витков, то «индуктированная» ЭДС

$$\epsilon = -\omega\Delta\Phi/\Delta t.$$

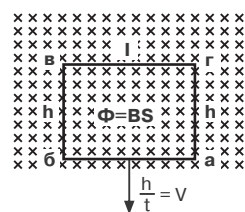
Произведение числа витков и магнитного потока, пронизывающих их, называется потокоцеплением  $\Psi = \omega\Phi$ , следовательно, «индуктированная» в катушке ЭДС

$$\epsilon = -\omega\Delta\Phi/\Delta t = -\Delta\Psi/\Delta t.$$

Эта формула, выражающая закон электромагнитной индукции, является исходной для определения ЭДС, индуктируемых в обмотках электротехнических машин и аппаратов.

Когда контур охватывается лишь частью магнитного потока, величина ЭДС индукции зависит от скорости изменения не всего потока, а лишь части его.

Допустим, что прямоугольный замкнутый контур  $абвг$ , стороны которого равны  $l$  и  $h$ , находится в магнитном поле, магнитная индукция которого во всех точках равна  $B$  (Тл) и направлена за плоскость рис. 3.18.



**Рис. 3.18.**

*Замкнутый контур, перемещающийся в магнитном поле*

Пусть контур, оставаясь в плоскости рисунка, перемещается с равномерной скоростью сверху вниз и в течение  $t_c$  выходит за пределы магнитного поля (рис. 3.18).

Так как контур  $абвг$  перемещается вниз, то магнитный поток, пронизывающий контур, уменьшается. Следовательно, направление ЭДС индукции совпадает с вращательным движением рукоятки буравчика, ввинчиваемого вдоль магнитных линий, т. е. по часовой стрелке.

Величина этой ЭДС индукции определится из следующих соображений. Площадь, ограниченная контуром проводника,  $S = lh$ . Магнитный поток, пронизывающий контур проводника,  $\Phi = BS$ .

Чтобы уйти за пределы магнитного поля, т. е. чтобы изменить магнитный поток от  $\Phi$  до нуля или на величину  $\Delta\Phi = \Phi$ , требуется, чтобы  $\Delta t = t$ .

Следовательно,  $E = \Delta\Phi/\Delta t = \Phi/t$  или  $E = Blh/t$ .

Частное от деления пути  $h$ , пройденного проводником, на время  $t$  представляет собой скорость движения этого проводника. Обозначив ее буквой  $v$ , получим  $E = Blv$ .

Если в этой формуле магнитная индукция  $B$  выражена в теслах, длина  $l$  — в метрах и скорость  $v$  — в метрах на секунду (м/с), то ЭДС индукции выражается в вольтах.



#### Примечание.

*Эта формула справедлива лишь в том случае, если проводник перемещается в магнитном поле в направлении, перпендикулярном магнитным силовым линиям этого поля.*

Если проводник пересекает магнитные линии под каким-либо углом, то  $E = Blv \times \sin\alpha$ , где  $\alpha$  — угол между направлением движения проводника и направлением вектора магнитной индукции (магнитных линий).

### Вихревые токи

Индукционные токи возникают не только в изолированных проводниках и обмотках, но и в сплошных металлических массах генераторов, электромагнитных аппаратов и механизмов, которые подвергаются действию изменяющихся магнитных полей.

Эти токи, названные **вихревыми**, вызывают дополнительные затраты энергии, превращающейся в тепло, нагревающее части приборов.

Вихревые токи, оказывающие вредное влияние, устраняют путем:

- ♦ специальной сборки сердечников;
- ♦ применения для их изготовления магнитомягких сортов стали.

Сердечники электромагнитных устройств (трансформаторов, дросселей, электродвигателей и т. д.) собирают из тонких листов стали, покрытых бумагой, окалиной или изолирующим лаком.



Однако полностью избежать нагревания, обусловленного вихревыми токами, невозможно, и в тех случаях, когда нагревание может достичь высоких степеней, прибегают к искусственному охлаждению приборов. Например, мощные трансформаторы помещают в бак с маслом, которое хорошо отводит тепло.

Потери энергии от вихревых токов зависят не только от свойств материала, в котором они возникают, и толщины стальных пластин, из которых собран магнитопровод аппарата или машины, но также от магнитной индукции и скорости ее изменения.

В некоторых случаях вихревые токи оказывают положительное влияние. Так, например, на использовании вихревых токов основана работа индукционных электродвигателей, индукционных электропечей для плавки металлов, индукционных электроизмерительных приборов (счетчики электроэнергии), сушка древесины, закалка металлов и др.

## 3.5. Самоиндукция. Расчет индуктивности

### Что такое самоиндукция

*Как известно, при изменении магнитного потока, пронизывающего виток проволоки, в этом витке возникает ЭДС индукции. Подобное явление наблюдается и в том случае, когда проходящий по витку ток изменяется по величине или направлению. Такой процесс возникновения электродвижущей силы индукции называется **самоиндукцией**.*

Самоиндукцию можно наблюдать, например, при размыкании и замыкании цепи тока. В момент размыкания вследствие исчезновения магнитного потока в цепи индуктируется ЭДС самоиндукции, которая стремится поддерживать неизменное значение тока.

В момент замыкания магнитный поток, создаваемый проходящим по цепи током, увеличивается, а появляющаяся ЭДС самоиндукции препятствует нарастанию тока.

Таким образом, при замыкании цепи вследствие противодействия ЭДС самоиндукции ток не может мгновенно достигнуть полной величины, а при размыкании также вследствие противодействия ЭДС самоиндукции исчезновение тока в цепи наступает не мгновенно, а постепенно.

В некоторых случаях, например, в измерительных приборах и при изготовлении реостатов, необходимо устранить самоиндукцию.

Чтобы устранить самоиндукцию, проволоку, применяемую для изготовления реостата, сгибают вдвое и в таком виде навивают на каркас.

При этом магнитное действие одного витка уничтожается действием соседнего и результирующий магнитный поток, образуемый током, протекающим по обмотке, будет равен нулю.

Следовательно, в такой обмотке не будет самоиндукции (рис. 3.19). Безындукционная обмотка называется **бифилярной**.



Рис. 3.19.  
Бифилярная  
обмотка

### Самоиндукция в прямолинейных проводниках



#### Примечание.

*Явление самоиндукции присуще не только обмоткам, но и прямолинейным проводникам.*

В этом случае ЭДС самоиндукции вызывается магнитным потоком, возникающим в контуре, ограниченном двумя проводниками или проводником и землей, если последняя составляет элемент цепи (рис. 3.20).

Допустим, что два прямолинейных проводника **аб** и **вг** включены в цепь батареи **Б** с помощью ключа **К**. При замыкании ключа в цепи возникает ток.

В первые моменты после замыкания ключа **К** контур, составленный проводниками **аб** и **вг**, будет пронизываться увеличивающимся магнитным потоком  $\Phi$ , магнитные линии которого (по правилу буравчика), окажутся направленными в пределах контура — за плоскость рисунка, а вне контура — из-за плоскости рисунка.

Под действием нарастающего магнитного потока  $\Phi$  в замкнутой цепи возникает ЭДС самоиндукции, которая будет направлена против вращательного движения рукоятки буравчика, т. е. навстречу току батареи **Б**.

Если замкнутый проводник состоит из одного витка проволоки, то магнитный поток  $\Phi$ , пронизывающий контур этого проводника при постоянной магнитной проницаемости, пропорционален току  $I$ , проходящему по проводнику.

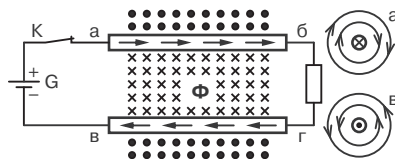


Рис. 3.20. Контур, ограниченный  
двумя проводниками

Обозначив коэффициент пропорциональности буквой  $L$ , можем написать следующее равенство:  $\Phi = LI$  или  $L = \Phi/I$ .

Величина  $L$  называется **индуктивностью** данного проводника.

Если рассматриваемый нами замкнутый контур состоит не из одного витка, а представляет собой обмотку, содержащую  $\omega$  витков, охватывающих один и тот же магнитный поток  $\Phi$ , то индуктивность такой обмотки  $L = \omega\Phi/I = \Psi/I$ .

### Единицы индуктивности



#### Примечание.

*Единицей индуктивности является генри (Гн). Один генри — это индуктивность такой цепи, в которой при равномерном изменении тока на один ампер в секунду индуцируется ЭДС самоиндукции в один вольт.*

Одна тысячная доля генри называется миллигенри (мГн),  $1 \text{ Гн} = 1000 \text{ мГн}$ .

Если в цепи, обладающей индуктивностью  $L$ , ток в течение  $\Delta t$  (с) изменяется на величину  $\Delta I$  (А), то в такой цепи возникает ЭДС самоиндукции  $e_L = -L\Delta I/\Delta t$ .

Знак минус в этой формуле указывает на то, что при уменьшении тока (приращение  $\Delta I$  отрицательная величина) ЭДС самоиндукции положительна и наоборот.

### Расчет самоиндуктивности

Намагничивающая сила  $F = \omega I$  возбуждает магнитное поле, которое встречает на своем пути магнитное сопротивление, равное  $R_M = l/\mu_a S$ , где

$l$  — длина магнитного пути, м;

$S$  — сечение этого пути, м<sup>2</sup>;

$\mu_a$  — абсолютная магнитная проницаемость среды, в которой замыкается магнитный поток.

По аналогии с электрической цепью закон Ома для магнитной цепи запишется в следующем виде:

$$\Phi = F/R_M = \omega I/R_M \text{ и } \Psi = \omega\Phi = \omega^2 I/R_M.$$

Следовательно, индуктивность

$$L = \Psi/I = \omega^2/R_M = \mu_a S \omega^2/l.$$

Магнитная цепь катушки состоит из двух участков:

- ♦ внутри катушки;
- ♦ вне катушки.

Магнитное сопротивление состоит также из двух частей: из внутреннего  $R_{м.в}$  и наружного  $R_{м.н}$  сопротивлений. Определить сопротивление вне катушки  $R_{м.н}$  для расходящегося в пространстве магнитного потока очень сложно.

Если длина катушки  $l_k$  значительно больше ее диаметра  $d_k$  ( $l_k \gg d_k$ ), то магнитным сопротивлением наружного участка можно пренебречь и считать индуктивность катушки равной:

$$L_k = \omega^2/R_{м.в} = \mu_0 S \omega^2/l = 4\pi \times 10^{-7} S \omega^2/l.$$

Если катушка помещена на замкнутый стальной магнитопровод (дроссель), относительная магнитная проницаемость материала которого  $\mu$ , то индуктивность дросселя  $L = 4\pi \cdot 10^{-7} \mu S \omega^2/l$ .

В случае, когда в магнитопроводе дросселя сделан немагнитный зазор длиной  $l_3$ , м, индуктивность дросселя

$$L = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{S \omega^2}{\sqrt{\left(l_3 + \frac{l_c}{\mu}\right)}},$$

где  $l_c$  — длина средней магнитной линии по стали сердечника дросселя, м.

### Расчет катушек индуктивности

Рассмотри расчет катушек индуктивности (однослойных, цилиндрических без сердечника). Индуктивность катушки зависит от ее геометрических размеров, числа витков и способа намотки катушки.



#### Примечание.

Чем больше диаметр, длина намотки и число витков катушки, тем больше ее индуктивность. Если катушка наматывается плотно виток к витку, то индуктивность ее будет больше по сравнению с катушкой, намотанной неплотно, с промежутками между витками.

Когда требуется намотать катушку по заданным размерам, но нет провода нужного диаметра, то при намотке ее более толстым проводом надо несколько увеличить, а тонким — уменьшить число витков катушки, чтобы получить необходимую индуктивность.

Все приведенные выше соображения справедливы при намотке катушек без ферритовых сердечников.

Расчет однослойных цилиндрических катушек производится по формуле

$$L = D^2 n^2 / (45D + 100l),$$

где  $L$  — индуктивность катушки, мкГн;

$D$  — диаметр катушки, см;

$l$  — длина намотки катушки, см;

$n$  — число витков катушки.

При расчете катушки могут встретиться два случая:

- ♦ по заданным геометрическим размерам необходимо определить индуктивность катушки;
- ♦ при известной индуктивности определить число витков и диаметр провода катушки.

В первом случае все исходные данные, входящие в формулу, известны, и расчет не представляет затруднений.



#### Пример.

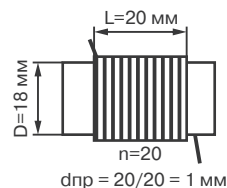
Определим индуктивность катушки, изображенной на (рис. 3.21), для этого подставим в формулу все необходимые величины:

$$L = 1,8^2 \times 20^2 / (45 \times 1,8 + 100 \times 2) \approx 4,6 \text{ мкГн.}$$

Во втором случае известны диаметр катушки и длина намотки, которая, в свою очередь, зависит от числа витков и диаметра провода.

Поэтому расчет рекомендуется вести в следующей последовательности. Исходя из конструктивных соображений, определяют размеры катушки, диаметр и длину намотки, а затем рассчитывают число витков по формуле

$$n = \frac{\sqrt{5L(9D + 20l)}}{D}.$$



**Рис. 3.21.**  
Определение индуктивности катушки

После того как будет найдено число витков, определяют диаметр провода с изоляцией по формуле

$$d = l/n,$$

где **d** — диаметр провода, мм;

**l** — длина обмотки, мм;

**n** — число витков.



**Пример.**

*Нужно изготовить катушку диаметром 1 см при длине намотки 2 см, имеющую индуктивность 0,8 мкГн. Намотка рядовая виток к витку.*

Подставив в последнюю формулу заданные величины, получим:

$$n = \frac{\sqrt{5 \times 0,8(9 \times 1 + 20 \times 2)}}{1} = 14.$$

Диаметр провода  $d = 20/14 = 1,43$  мм.

Если эту катушку наматывать проводом меньшего диаметра, то нужно полученные расчетным путем 14 витков разместить по всей длине катушки (20 мм) с равными промежутками между витками, т. е. с шагом намотки.



**Примечание.**

*Индуктивность данной катушки будет на 1—2% меньше номинальной, что следует учитывать при изготовлении таких катушек.*

При намотке в случае необходимости более толстым проводом, чем 1,43 мм, следует сделать новый расчет, увеличив диаметр или длину намотки катушки.

Возможно, также придется увеличить и то и другое одновременно, пока не будут получены необходимые габариты катушки, соответствующие заданной индуктивности.



**Примечание.**

*Следует заметить, что по приведенным выше формулам рекомендуется рассчитывать такие катушки, у которых длина намотки  $l$  равна или больше половины диаметра.*

Если же длина намотки меньше половины диаметра  $D/2$ , то более точные результаты можно получить по формулам

$$L = D^2 n^2 / 10 (4D + 11l);$$

$$n = \frac{\sqrt{10L(4D + 11l)}}{D}.$$

### 3.6. Энергия магнитного поля. Взаимоиндукция

При включении цепи, содержащей сопротивление и индуктивность, ток не сразу достигает своего установившегося значения  $I = U/R$ , так как индуцируемая ЭДС самоиндукции  $e_L = -L\Delta i/\Delta t$  противодействует изменению тока, задерживая его увеличение.

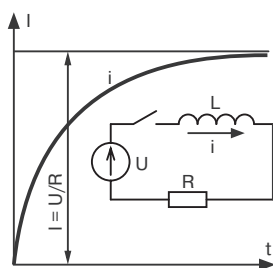


Рис. 3.22. Переходной процесс

При постепенном возрастании тока в окружающем пространстве возникает магнитное поле, и в нем происходит накопление части энергии, израсходованной источником тока.

Когда ток в цепи достигает установившегося значения  $I = U/R$ , его возрастание прекращается, и ЭДС самоиндукции исчезает (рис. 3.22).

Таким образом, в переходном процессе напряжение источника электроэнергии затрачивается не только на преодоление сопротивления  $R$ , но и на преодоление ЭДС самоиндукции, т. е.

$$U = iR + (-e_L) = iR + L\Delta i/\Delta t.$$

Умножив это уравнение напряжения на  $i\Delta t$ , получим энергетическое уравнение цепи:

$$U i \Delta t = i^2 R \Delta t + L i \Delta i.$$

Левая часть этого уравнения выражает энергию, сообщаемую источником электрической цепи за время  $\Delta t$ .

Первый член правой части уравнения определяет энергию, израсходованную на нагрев сопротивления  $R$  за то же время  $\Delta t$ .

Второе слагаемое правой части уравнения выражает энергию, накапливаемую в магнитном поле за время  $\Delta t$  при увеличении тока на  $\Delta i$ , т. е.

$$\Delta W_M = L i \Delta i = \Psi \Delta i.$$

Если в магнитном поле нет ферромагнитных материалов, то магнитный поток  $\Phi$ , а, следовательно, и потокоцепление  $\Psi$  прямо пропорциональны силе тока  $I$ .

Линейная зависимость потокоцепления от тока графически изображена на рис. 3.23 прямой линией, проходящей через начало координат и образующей с осью тока угол  $\alpha$ , зависящий от выбранного масштаба для  $\Psi_\Phi$  и  $I$ .

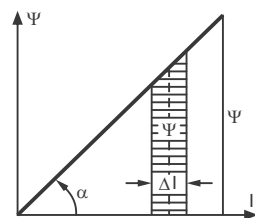


Рис. 3.23. Линейная зависимость потокоцепления от тока

На графике изменение энергии магнитного поля  $\Psi \Delta i$  изображится заштрихованной площадью.

В момент, когда магнитный поток достигнет значения  $\Phi = \omega I/R_M$ , соответствующего установившемуся значению тока  $I = U/R$ , ЭДС самоиндукции исчезает, и накопление энергии в магнитном поле прекращается.

Накопленная в магнитном поле энергия  $W_M$  (Дж) при возрастании тока в цепи на графике выразится суммой всех площадок  $\Psi \Delta i$  при изменении тока от 0 до установившегося значения  $I$ , т. е. площадью прямоугольного треугольника с катетами  $\Psi$  и  $I$ , т. е.  $W_m = \Psi I/2 = LI^2/2$ .

При некоторых расчетах нужно знать запас энергии в единице объема магнитного поля, называемый удельной энергией магнитного поля. Заменив в предыдущей формуле  $\Psi = \omega_\Phi = \omega_{BS}$  и  $\omega_I = H_r$ , получим:

$$W_m/IS = W_m/V = BH/2,$$

где  $V = IS$  — объем, занимаемый равномерным магнитным полем,  $m^3$ .



#### Примечание.

Рассмотренное нами явление образования индукционных токов в параллельных проводниках называется **взаимоиндукцией**.

Взаимоиндукция наблюдается не только в моменты возникновения и исчезновения тока, но и при всяком его изменении.



#### Определение.

Появляющаяся в подобных случаях ЭДС в цепях, непосредственно не содержащих источников тока, называется **ЭДС взаимной индукции**.

Возникновение ЭДС взаимной индукции объясняется тем, что контур замкнутого проводника пронизывается изменяющимся магнитным



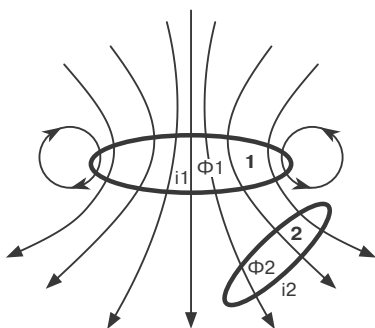


Рис. 3.24. Схема к возникновению ЭДС взаимной индукции в замкнутых витках

поток, который создается током, проходящим по соседнему проводнику (рис. 3.24).

Допустим, имеется два контура 1 и 2, состоящие каждый из одного замкнутого витка. При прохождении тока  $I_1$  по контуру 1 от какого-либо источника (не показанного на рис. 3.24) возбуждается магнитный поток  $\Phi_1$ , который частично пронизывает и контур 2.

Очевидно, что величины как всего магнитного потока  $\Phi_1$ , так и его части  $\Phi_2$ , пронизывающей контур 2, пропорциональны току  $I_1$ .

Таким образом, соотношение между потоком  $\Phi_2$  и током  $I_1$  можно представить в виде следующего равенства:  $\Phi_2 = MI_1$ , где  $M$  — некоторый коэффициент, зависящий от геометрических размеров контуров и их взаимного расположения.



#### Примечание.

Этот коэффициент называется **коэффициентом взаимной индукции**.

Взаимная индукция так же, как и индуктивность, измеряется в генри, миллигенри и микрогенри. Взаимной индукцией в один генри обладают два контура в том случае, если в одном из них возникает ЭДС взаимной индукции в один вольт при равномерном изменении тока на один ампер в одну секунду в другом контуре.

Величина взаимной индукции  $M$  между двумя контурами может быть выражена через индуктивности этих контуров. Если индуктивность одной цепи  $L_1$ , а индуктивность второй  $L_2$  и магнитный поток, возникающий в контуре первой цепи (влияющей), полностью пронизывает контур второй цепи (подвергнутой влиянию), то

$$M = \sqrt{L_1 L_2}.$$

Поскольку практически всегда часть магнитных линий первой цепи замыкается помимо второй цепи или, как говорят, всегда происходит **рассеяние магнитного потока**, то практически

$$M \ll \sqrt{L_1 L_2}.$$

Таким образом, в предыдущее равенство должен быть введен некоторый множитель  $k$ , меньший, чем единица:

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}.$$



**Примечание.**

Множитель  $k$  называется *коэффициентом связи*.

Явление взаимной индукции используется в трансформаторах. В ряде случаев явление взаимной индукции оказывает вредное влияние.

**Например**, при сближении проводов высоковольтных цепей с линиями связи взаимная индукция может быть не только источником помех, но и опасных перенапряжений в линиях связи.

### 3.7. Вопросы для тестирования

**Вопрос №1.**

Как определить направление магнитного поля, возбужденного вокруг проводника с током?

а) Второй Закон Кирхгофа; б) правило левой руки; в) правило буравчика; г) правило правой руки.

**Вопрос №2.**

Что называется напряженностью магнитного поля?

а) Магнитные линии поля; б) напряжение магнитных сил; в) магнитодвижущая сила; г) сила притяжения.

**Вопрос №3.**

Произведение магнитной индукции на величину какой-либо поверхности в магнитном поле, расположенной перпендикулярно направлению магнитных линий, называется:

а) ... магнитным потоком; б) ... законом полного тока; в) ... магнитной проницаемостью; г) ... самоиндукцией.

**Вопрос №4.**

Между магнитной индукцией и напряженностью поля существует отношение, что это:

а) ... взаимоиндукция; б) ... относительная магнитная проницаемость; в) ... самоиндукция; г) ... абсолютная магнитная проницаемость.

**Вопрос №5.**

Проходящий по витку ток изменяется по величине или направлению, возникает ЭДС индукции. Как называется процесс?

а) Взаимоиндукцией; б) гистерезисом; в) самоиндукцией; г) переманчиванием.

**Вопрос №6.**

Какова причина, вызывающая появление индукционных токов?

а) Индуктивное сопротивление; б) магнитная индукция; в) ЭДС индукции; г) магнитный поток.

**Вопрос №7.**

Единицей чего является генри (Гн) ?

а) Магнитного потока; б) магнитной проницаемости; в) напряженности поля; г) индукции.

**Вопрос №8.**

Что представляет собой явление взаимоиндукции?

а) Коэффициент переманчивания стали; б) коэффициент, зависящий от активного и индуктивного сопротивлений; в) коэффициент полезного индуктивного действия; г) коэффициент, зависящий от размеров контуров и их расположения друг к другу.

**Вопрос №9.**

Где используется явление взаимоиндукции?

а) В аккумуляторах; б) в трансформаторах; в) в нагревательных приборах; г) при передаче электроэнергии на расстояние.

**Вопрос №10.**

Отставание уменьшения магнитной индукции от уменьшения напряженности магнитного поля называется:

а) ... явлением взаимоиндукции; б) ... переманчиванием; в) ... гистерезисом; г) ... энергией магнитного поля.

## ЧЕТВЕРТЫЙ ШАГ

# НАЧИНАЕМ ИЗУЧАТЬ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК



Сделав ЧЕТВЕРТЫЙ шаг, вы познакомитесь с переменным током, который наиболее широко используется в быту, рассмотрев такие вопросы. Получение ЭДС. Синусоидальная ЭДС. Активное сопротивление, катушка индуктивности в цепи переменного тока. Активное, индуктивное и емкостное сопротивления в цепи переменного тока. Параллельное соединение реактивных сопротивлений. Резонанс токов. Мощность. И в завершении — ответите на вопросы для самотестирования.

## 4.1. Получение ЭДС. Синусоидальная ЭДС

### Получение переменной электродвижущей силы

Постоянный ток в металлах, как известно, представляет собой установившееся поступательное движение свободных электронов (рис. 4.1) по схеме, рассмотренной на рис. 4.2.



Рис. 4.1. Поступательное движение свободных электронов

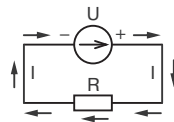


Рис. 4.2. Схема постоянного тока



### Определение.

Если эти электроны вместо поступательного совершают колебательное движение (рис. 4.3), то ток периодически, через равные промежутки времени, изменяется как по величине, так и по направлению по схеме (рис. 4.4) и называется **переменным**.



Рис. 4.3. Колебательное движение свободных электронов

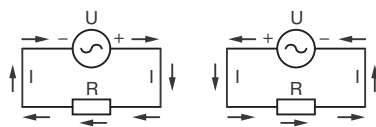


Рис. 4.4. Схема переменного тока

Переменный ток обладает способностью трансформироваться (изменять напряжение с помощью трансформаторов), что обеспечивает экономичную передачу электрической энергии на большие расстояния.

Кроме того, двигатели переменного тока отличаются простотой устройства и малыми габаритами. Поэтому переменный ток применяется очень широко, и почти вся электрическая энергия вырабатывается генераторами переменного тока.

В магнитном поле электромагнита  $NS$ , возбуждаемом постоянным током в его обмотке, помещен виток из проводников 1 и 2. Концы витка соединены с металлическими кольцами, изолированными как друг от друга, так и от корпуса, и вращающимися вместе с витком (рис. 4.5).

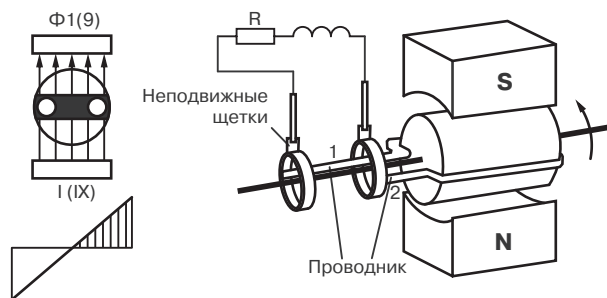


Рис. 4.5. Схема устройства простейшего генератора переменного тока

На кольцах установлены неподвижные щетки, с помощью которых виток может быть замкнут на сопротивление внешней нагрузки.

Предположим, что магнитное поле между полюсами  $N$  и  $S$  равномерно, т. е. магнитная индукция по величине и направлению всюду одинакова.

За время одного оборота плоскость витка описывает угол в  $360^\circ$ . Разобьем этот угол на восемь равных частей по  $45^\circ$  каждая и рассмотрим, как будет изменяться магнитный поток, пронизывающий контур витка, при его переходе из одного положения в другое в процессе вращения. Отдельные положения витка относительно магнитного поля показаны в верхней части рис. 4.5.

Начнем рассматривать с момента, когда плоскость витка расположена перпендикулярно направлению магнитных линий (положение I).

В этот момент контур витка пронизывается наибольшим магнитным потоком, величину которого обозначим  $\Phi_1$ .

Движение проводников витка происходит в вертикальном направлении, совпадающем с направлением магнитных силовых линий. Следовательно, проводники не пересекают магнитных линий. Потому магнитный поток, пронизывающий контур витка, не изменяется, и ЭДС равна нулю.

Начиная с этого положения, проводники 1 и 2 витка, двигаясь по окружности, перемещаются под углом к направлению магнитных линий и пересекают их. Пересеченные магнитные линии оказываются вне витка и, следовательно, магнитный поток, пронизывающий контур витка, уменьшается. Так как величина этого магнитного потока изменяется, то на основании закона электромагнитной индукции в витке возникает ЭДС индукции.

При переходе плоскости витка из положения I в положение II, т. е. при повороте на угол  $45^\circ$ , ЭДС индукции возрастает до некоторой величины, определяемой отношением изменения магнитного потока от  $\Phi_1$  до  $\Phi_2$ , т. е.  $\Phi_1 - \Phi_2$ , к времени  $\Delta t$ , в течение которого происходит изменение (рис. 4.6).

ЭДС в витке имеет следующее направление (положение II): в проводе 1 — за плоскость рис. 4.6, а в проводе 2 — из-за плоскости рисунка.



#### Примечание.

Условимся считать это направление ЭДС **положительным**.

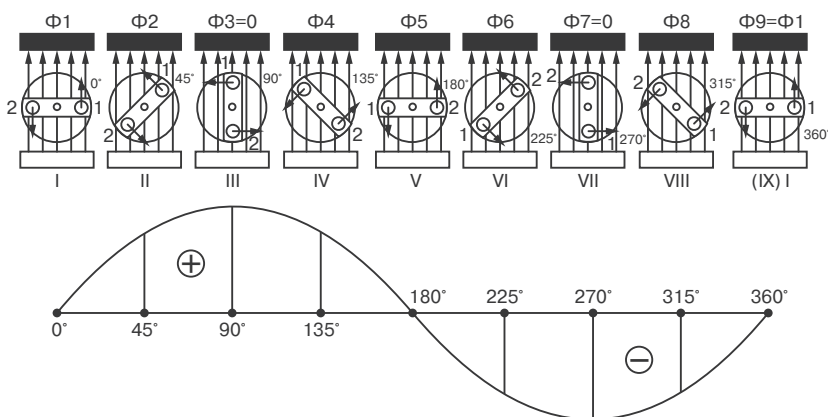


Рис. 4.6. Временная диаграмма

В таком случае величину ЭДС, действующую в замкнутой цепи витка в момент прохода его через положение II, мы должны отложить в виде некоторого отрезка, как это показано на диаграмме, в нижней части рис. 4.6.

При переходе плоскости витка из положения II в положение III, т. е. при повороте еще на угол  $45^\circ$ , магнитный поток, пронизывающий контур витка, уменьшившись до нуля, изменится на величину  $\Phi_2 - 0 = \Phi_2$ .

Так как в данном случае магнитный поток изменится больше, чем при переходе витка из положения I в положение II, то ЭДС в витке, когда он находится в положении II, больше ЭДС, соответствующей положению II.

Поэтому ЭДС, соответствующую положению III витка, когда плоскость его находится под углом  $90^\circ$  к направлению исходного положения, мы должны отложить в виде отрезка большей величины, чем предыдущий.

Этот отрезок, как и предыдущий, отложен на диаграмме выше горизонтальной оси потому, что в обоих проводах 1 и 2 электродвижущая сила имеет положительное направление, т. е. в проводе 1 — за плоскость рисунка, а в проводе 2 — из-за плоскости рисунка, в чем нетрудно убедиться, применив правило правой руки.

Во время дальнейшего вращения плоскости витка ЭДС в нем будет уменьшаться, оставаясь положительной. Когда плоскость витка повернется на  $180^\circ$  от начального положения и займет положение V, ЭДС в нем уменьшится до нуля, несмотря на то, что магнитный поток, пронизывающий контур витка, также как и при положении I, имеет наибольшую величину.

После перехода плоскости витка через положение V направление ЭДС индукции в нем изменяется: в проводе 1 — из-за плоскости рисунка, а в проводе 2 — за плоскость рис. 4.6.

По мере поворота витка ЭДС в нем по абсолютной величине увеличивается. В момент прохода витка через положение VII ЭДС имеет наибольшее значение, равное по абсолютной величине, но противоположное по знаку ЭДС в витке при положении III.

При дальнейшем вращении витка ЭДС в нем по абсолютной величине уменьшается и, наконец, при повороте плоскости витка на  $360^\circ$  от начального положения становится равной нулю. С этого момента процесс изменения ЭДС повторяется аналогично «описанному» выше.

Соединив вершины отрезков, выражающих величины ЭДС для отдельных положений плоскости витка, плавной линией, получим

так называемую **временную диаграмму**, представляющую собой *синусоиду*.



### Определение.

*Переменная ЭДС и ток, «изменяющиеся» согласно указанной кривой, называются **синусоидальными**.*

Таким образом, величина ЭДС, «индуцируемой» в проводнике, перемещающемся с равномерной скоростью в однородном магнитном поле, зависит:

- ♦ от угла между направлением магнитных линий;
- ♦ направлением движения этого проводника.

## Синусоидальная движущая сила

Переменный синусоидальный ток проходит в цепи под действием синусоидальной электродвижущей силы.

Электродвижущая сила индукции, возникающая в прямолинейном проводнике, пересекающем магнитные линии (рис. 4.7), выражается следующей формулой:

$$e = Blv \times \sin \alpha,$$

где  $B$  — магнитная индукция;  $l$  — длина проводника;  $V$  — скорость его перемещения.

При вращении замкнутого проводника в магнитном поле легко подсчитать величину ЭДС, индуцируемой в этом проводнике, зная, на какой угол  $\alpha$  повернулась плоскость проводника от исходного положения перпендикулярно направлению магнитных линий.

Максимального значения или, как говорят, **амплитуды**, ЭДС достигает в тот момент, когда угол  $\alpha = 90^\circ$ .

Обозначив амплитуду ЭДС через  $E_m$ , найдем:  $E_m = Blv$ .

Через амплитуду можно выразить мгновенное значение ЭДС в произвольный момент, когда стороны замкнутого проводника пересекают магнитные линии под некоторым углом  $\alpha$ , а именно:  $e = E_m \sin \alpha$ .

Угол  $\alpha$  в данном случае называется **фазовым углом** ЭДС, или **фазой**.

Электродвижущая сила генератора переменного тока, также как в цепях постоянного тока, уравнивается падениями напряжения

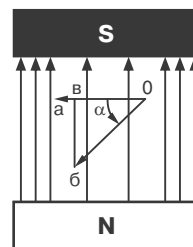


Рис. 4.7. Схема перемещения проводника под углом к направлению магнитных линий



на внутреннем сопротивлении генератора и сопротивлении внешней цепи.

Ту часть ЭДС, которая уравнивается во внешней цепи, называют **напряжением генератора** и обозначают его мгновенное значение буквой  $u$ , а максимальное (амплитуду) — буквой  $U_m$ .

Для определения мгновенного значения электродвижущей силы  $e$  амплитуду  $E_m$  надо умножить на синус фазового угла (фазы)  $\alpha$ .

Следовательно, если мы построим радиус-вектор  $0a$  (рис. 4.8), равный (в масштабе напряжения) величине амплитуды  $E_m$ . Будем вращать его против часовой стрелки с постоянной частотой вращения (это направление вращения принято считать положительным). При этом конец вектора опишет некоторую окружность с радиусом  $E_m$ .

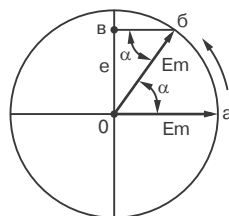


Рис. 4.8. Векторная диаграмма

Допустим, что через некоторое время  $t$  (с) отрезок повернулся на угол  $\alpha$  и занял положение  $0b$ .

Опустив перпендикуляр из конца отрезка  $0b$  на вертикальный диаметр, получим прямоугольный треугольник  $0Bb$ . Из этого треугольника находим:  $0B = E_m \sin \alpha$ .

Сопоставляя полученное равенство с уравнением  $e = E_m \sin \alpha$ , убеждаемся, что отрезок  $0B$  представляет собой мгновенное значение ЭДС, соответствующее фазовому углу  $\alpha$ .

Способ изображения ЭДС, токов и напряжений в виде прямых линий определенной длины и определенного направления, или так называемых **векторов**, широко применяется в теории переменных токов.



#### Определение.

Соотношение между отдельными электрическими величинами и их взаимное расположение на плоскости, выраженное графически в форме векторов, называется **векторной диаграммой**.



#### Определение.

Промежуток времени, необходимый для совершения переменной ЭДС полного цикла (круга) своих изменений, называется **периодом колебаний** или сокращенно **периодом**.

Период обозначается  $T$  и измеряется в секундах.

**Определение.**

Число периодов в одну секунду (или величина, обратная периоду) называется **частотой колебаний** или сокращенно **частотой**.

Частота обозначается  $f = 1/T$  и измеряется в герцах (Гц). Так как в рассмотренной нами диаграмме радиус  $OA$ , равный  $E_m$ , в течение одного периода  $T$  описывает угол  $\alpha = 2\pi = 360^\circ$ , то отношение  $2\pi/T$  является углом, описываемым тем же радиус-вектором в одну секунду.

Следовательно, отношение  $2\pi/T$  выражает собой угловую частоту вращения радиус-вектора.

Угловая частота обозначается греческой буквой  $\omega$  (омега) и равна:  $\omega = 2\pi/T$ .

Если  $\omega$  представляет собой угол, описываемый радиус-вектором за одну секунду, то за время  $t$  угол  $\alpha$ , описываемый тем же радиус-вектором и называемый, как мы уже знаем, **фазой**, будет равен:  $\alpha = \omega t$ .

Так как один полный оборот совершается радиус-вектором в течение  $T$ , с, то между частотой и периодом существует соотношение  $f = 1/T$  или  $T = 1/f$ .

Подставляя вместо  $T$  его значение в формулу для  $\omega$ , получим:  $\omega = 2\pi f$ .

## 4.2. Активное сопротивление, катушка индуктивности в цепи переменного тока

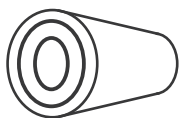
### Активное сопротивление в цепи переменного тока

Рассмотрим явления, происходящие во внешней цепи с некоторым резистором. Если сопротивление постоянному току цепи равно  $R_1$ , то при протекании по этой цепи переменного тока сопротивление ее возрастает и станет равным некоторой величине  $R$ .

Опыт показывает, что с увеличением частоты переменного тока сопротивление  $R$  возрастает.

**Определение.**

Сопротивление проводника (не обладающего ни индуктивностью, ни емкостью) переменному току называется **активным сопротивлением**.



*Рис. 4.9. Проводник, разделенный на концентрические окружности*

Поскольку активное сопротивление проводника возрастает с увеличением частоты, то это явление, возникающее вследствие поверхностного эффекта, имеет существенное значение при высоких частотах.

Для пояснения поверхностного эффекта разделим мысленно прямолинейный провод по всей его длине на ряд концентрических цилиндров с равновеликими кольцевыми, поперечными сечениями (рис. 4.9).

Если по такому проводу протекает постоянный ток, то очевидно, что плотность тока, т. е. число ампер на один квадратный сантиметр сечения, во всех кольцах будет одинакова, а вокруг каждого из них возникает постоянное магнитное поле.

Таким образом, воображаемые нами концентрические проводники окажутся окруженными замкнутыми потоками, причем по мере приближения к оси провода потоки, охватывающие эти проводники, складываясь, будут увеличиваться.

Допустим, что по тому же проводнику протекает переменный ток. В этом случае возникающие вокруг воображаемых нами цилиндрических проводников магнитные потоки будут также переменными.

Следовательно, на основании закона электромагнитной индукции в каждом из цилиндрических проводников будут появляться ЭДС самоиндукции, увеличивающиеся по мере приближения рассматриваемых проводников к оси провода.

Таким образом, при переменном токе возникающие переменные магнитные потоки в самом проводе наводят ЭДС, противодействующие основному напряжению, приложенному к концам провода.

Это противодействие будет тем больше, чем ближе рассматриваемое сечение к оси провода. В результате этого ток в сечении провода распределяется не с одинаковой плотностью, а с увеличивающейся плотностью от оси к поверхности провода.

Явление поверхностного эффекта как бы уменьшает полезное сечение провода, и, следовательно, увеличивает сопротивление  $R$ .

При частоте тока 50 Гц (применяющейся в промышленной электротехнике) и небольшом поперечном сечении проводника поверхностный эффект незначительно увеличивает сопротивление, а потому практически активное сопротивление проводников можно считать равным их сопротивлению постоянному току.

При токах высоких частот разница между указанными сопротивлениями становится значительной.

Допустим, что к зажимам цепи (рис. 4.10) от генератора подается напряжение, изменяющееся по синусоидальному закону, т. е.  $u = U_m \sin \omega t$ .

Ток, протекающий в любой момент, определится по закону Ома как частное от деления мгновенного значения напряжения и на активное сопротивление  $R$ , т. е.  $i = u/R$ .

Подставляя вместо  $u$  его значение из предыдущего выражения, получим:

$$i = U_m / R \sin \omega t.$$

Это равенство указывает на то, что ток может быть графически изображен как в виде вектора, так и в виде синусоидальной кривой (рис. 4.11).

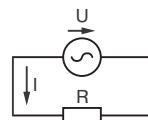


Рис. 4.10. Цепь переменного тока с активной нагрузкой

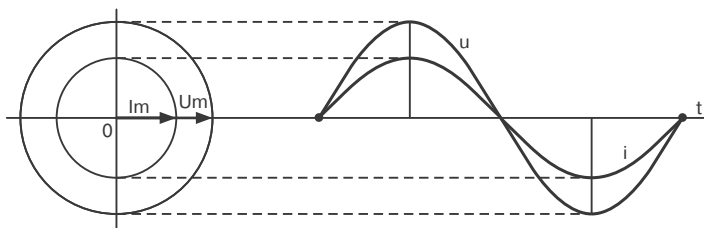


Рис. 4.11. Векторная и волновая диаграммы для напряжения  $u$  и тока  $i$

Обозначив амплитуду тока  $I_m$ , т. е.  $I_m = U_m/R_m$ , получим для мгновенного значения тока  $i$  следующее выражение:  $i = I_m \sin \omega t$ .

Для начального момента (начала периода), когда  $t = 0$ , фаза  $\omega t = 0$ .

Следовательно,  $u = U_m \sin \omega t = 0$  и  $i = I_m \sin \omega t = 0$ .

Таким образом, начала синусоид, изображающих напряжение и ток, совпадают с началом периода. Вектор напряжения  $U_m$  и вектор тока  $I_m$  должны быть начерчены горизонтально, вправо от точки  $O$ , причем вектор  $U_m$  — в масштабе напряжения, а вектор  $I_m$  — в масштабе тока.

Как видно из временных диаграмм, ток и напряжение одновременно равны нулю. Они одновременно достигают своих максимальных значений (амплитуд) и одновременно меняют знак при переходе через нулевые значения. Такие одновременные изменения напряжения и тока указывают на то, что они совпадают по фазе.

Следовательно, если внешняя цепь содержит лишь активное сопротивление и не обладает ни индуктивностью, ни емкостью, то напряжение, приложенное к этой цепи, и ток, проходящий в ней, совпадают по фазе.

### Действующие значения тока и напряжения

Как мы уже знаем, величины  $u = U_m \sin \omega t$  и  $i = I_m \sin \omega t$  представляя собой мгновенные значения напряжения и тока, относящиеся к отдельным моментам, не определяют значения тока за некоторый промежуток времени.

Поэтому для суждения о величине переменного тока его приравнивают к величине такого эквивалентного постоянного тока, который, протекая по такому же сопротивлению что и переменный ток, производит одинаковое с ним тепловое действие. Т. е. за один и тот же промежуток времени (за время одного или нескольких периодов  $T$ ) выделяет одинаковое количество тепла.

Такая величина переменного тока называется **действующей**. Очевидно, что действующее значение тока меньше амплитудного.

Отношение между амплитудным значением  $I_m$  переменного тока и его действующим значением  $I$  равняется  $\sqrt{2} = 1,414$ , т. е.  $I = I_m / \sqrt{2} = 0,707 I_m$ .

Подобные соотношения относятся к действующим значениям напряжения  $U$  и ЭДС  $E$ , т. е.  $U_m = U \sqrt{2} = 1,41 \times U$  и  $E_m = 1,41 \times E$  или  $U = 0,707 U_m$  и  $E = 0,707 E_m$ .

Приборы, предназначенные для измерения напряжения и тока, а именно: вольтметры и амперметры, дают показания действующих значений соответственно напряжения и тока.

**Например**, если вольтметр показывает напряжение переменного тока 110 В, то максимальное значение этого напряжения равно  $110 \sqrt{2} = 155,54$  В.

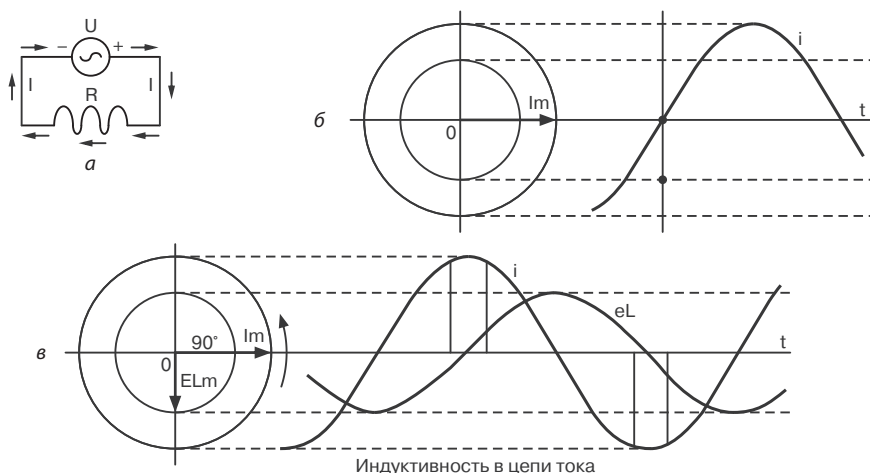
### Катушка индуктивности в цепи переменного тока

Допустим, что переменное напряжение с амплитудой  $U_m$  приложено к зажимам катушки с индуктивностью  $L$  (Г) и настолько малым активным сопротивлением  $R$ , что им можно пренебречь (рис. 4.12, а).



#### Примечание.

*Если бы вместо переменного напряжения мы приложили к той же катушке постоянное напряжение, то ввиду ничтожности активного сопротивления ток в цепи достиг бы очень большой величины.*



**Рис. 4.12.** Индуктивность в цепи переменного тока:  
 а — схема; б — векторная и волновая диаграммы разности фаз (сдвиг фаз) тока  
 и ЭДС самоиндукции; в — векторная и волновая диаграммы для тока и ЭДС

При переменном напряжении ток в катушке будет иметь меньшую величину. Это объясняется тем, что при переменном напряжении в катушке возникает также переменная ЭДС самоиндукции, которая складывается геометрически с приложенным напряжением и в результате оказывает влияние на ток (рис. 4.12, б).

Как известно, ЭДС самоиндукции выражается формулой  $e_L = -L \Delta i / \Delta t$ .

Ток в цепи, содержащей индуктивность  $L$ , протекает под действием напряжения источника энергии и ЭДС самоиндукции  $e_L$ , возникающей в цепи вследствие изменения тока, т. е.  $i = (u + e_L) / R$ , откуда  $u = (-e_L) + iR$ .

Так как в нашем случае  $R \approx 0$ , то  $u = -e_L = L \Delta i / \Delta t$ , где  $\Delta i / \Delta t$  — скорость изменения тока во времени.

В момент  $t$  ток в цепи  $i = I_m \sin \omega t$ , а спустя очень малый отрезок времени  $\Delta t$  ток будет  $i + \Delta i = I_m \sin \omega (t + \Delta t)$ .

Следовательно, за этот отрезок времени ток изменится на величину

$$\Delta i = I_m (\sin \omega (t + \Delta t) - \sin \omega t).$$

Синус суммы  $\sin(\omega t + \omega \Delta t) = \sin \omega t \cos \omega \Delta t + \cos \omega t \sin \omega \Delta t$ , причем косинус очень малого угла  $\omega \Delta t$  равен единице ( $\cos \omega \Delta t \approx 1$ ), а синус этого угла равен соответствующей дуге ( $\sin \omega \Delta t \approx \omega \Delta t$ ).

На основании этого получим:

$$\Delta i = I_m (\sin \omega t + \omega \Delta t \cos \omega t - \sin \omega t) = I_m \omega \Delta t \cos \omega t.$$

Скорость изменения синусоидального тока  $\Delta i / \Delta t = I_m \omega \cos \omega t$  и пропорциональные этой скорости ЭДС самоиндукции и напряжение источника энергии

$$u = -eL = I_m \omega L \cos \omega t = I_m \omega L \sin(\omega t + 90^\circ).$$

Векторная диаграмма показывает, что между током и ЭДС самоиндукции существует разность фаз (сдвиг фаз). Ток опережает ЭДС самоиндукции по фазе на угол  $\varphi = 90^\circ$  (рис. 4.12, в).

Амплитуда ЭДС самоиндукции  $E_{Lm}$ , пропорциональная скорости изменения тока во времени, в зависимости от угловой частоты  $\omega$  и амплитуды переменного тока  $I_m$  выражается формулой  $E_{Lm} = \omega L I_m$ .

Из этой формулы видно, что при неизменной индуктивности  $L$  ЭДС самоиндукции увеличивается с возрастанием угловой частоты  $\omega$ , т. е с увеличением частоты переменного тока  $f$ .

Действующее значение ЭДС самоиндукции  $E_L = (I_m / \sqrt{2}) \times \omega L = \omega L I$ , где  $I$  — действующее значение тока.

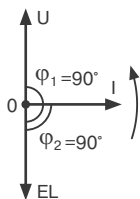


Рис. 4.13. Векторная диаграмма опережения напряжением тока по фазе на угол  $90^\circ$

Поскольку ЭДС самоиндукции отстает по фазе от тока на угол  $90^\circ$ , и напряжение, приложенное к зажимам катушки, преодолевает действие ЭДС, т. е. направлено к ней противоположно, это опережает ток по фазе на угол  $90^\circ$ . Это изображено на векторной диаграмме (рис. 4.13).

Векторная диаграмма показывает, что в цепи с индуктивностью без активного сопротивления напряжение, приложенное к этой цепи, опережает ток по фазе на угол  $\varphi_1 = 90^\circ$ , причем ток также опережает ЭДС самоиндукции по фазе на угол  $\varphi_2 = 90^\circ$ .

Действующее значение напряжения, приложенного к индуктивности,  $U = \omega L I$ , откуда  $I = U / \omega L$ .

Полученная формула представляет собой выражение закона Ома для цепи переменного тока, обладающей индуктивностью.

Величина  $\omega L$  называется **индуктивным сопротивлением**, обозначается  $X_L$  и измеряется в омах.

Итак,  $X_L = \omega L$ .

Как видно из этого выражения, индуктивное сопротивление возрастает с увеличением частоты тока.

### 4.3. Активное, индуктивное и емкостное сопротивления в цепи переменного тока

#### Цепь переменного тока, содержащая активное и индуктивное сопротивления

Электрическая цепь с одним лишь индуктивным сопротивлением в действительности невозможна, так как всякая обмотка, помимо индуктивного сопротивления, обладает также активным сопротивлением.

Поэтому рассмотрим случай, когда приемник, включенный в цепь переменного тока, имеет активное сопротивление  $R$  (рис. 4.14, а) и индуктивность  $L$ , т. е. индуктивное сопротивление  $X_L$ .

Допустим, что по цепи проходит переменный ток с частотой, соответствующей угловой частоте  $\omega = 2\pi f$ , и с действующим значением  $I$ , что начальная фаза тока равна нулю и ток изображается вектором  $I$  (рис. 4.14, б), расположенным горизонтально.

Ток  $I$ , проходя по активному сопротивлению  $R$ , создает падение напряжения  $U_a = IR$ . Напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с током. Поэтому вектор напряжения  $U_a$  на диаграмме построен по направлению вектора тока  $I$ .



#### Примечание.

Напряжение  $U_a$  называется **активным падением напряжения**.

Так как рассматриваемая нами цепь обладает и индуктивностью, то для преодоления ЭДС самоиндукции потребуется напряжение  $U_L = IX_L$ .



#### Примечание.

Напряжение  $U_L$  называется **индуктивным падением напряжения**.

Напряжение на индуктивности опережает по фазе ток на угол  $90^\circ$ . Поэтому вектор напряжения  $U_L$  построен под углом  $90^\circ$  в сторону опе-

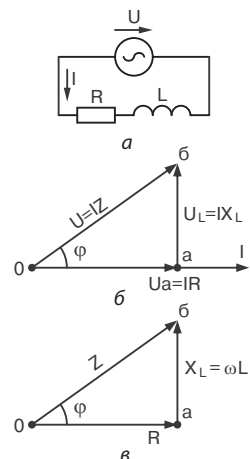


Рис. 4.14. Цепь переменного тока, содержащая активное сопротивление и индуктивность:

а — схема;  
б — векторная диаграмма;  
в — треугольник сопротивлений



режения (против часовой стрелки). Следовательно, напряжение на зажимах цепи равно геометрической сумме векторов

$$U_a = IR \text{ и } U_L = IX_L.$$

Сложив эти векторы геометрически, получим вектор напряжения  $U$ , определяющий своей величиной и направлением действующее значение напряжения генератора в цепи.

Вектор  $I$  отстает от вектора  $U$  на некоторый угол, обозначенный нами  $\Psi$ .

Кроме того, вектор  $U$  является гипотенузой прямоугольного треугольника  $OAb$ , называемого **треугольником напряжений**.

Катет треугольника  $Oa$  равен  $U_a$ , а катет  $ab$  равен  $U_L$ .

Поэтому мы можем написать:

$$U^2 = U_a^2 + U_L^2 \text{ или } U^2 = (IR)^2 + (IX_L)^2 = I^2 (R^2 + X_L^2).$$

Извлекая квадратный корень из обеих частей последнего равенства, находим:

$$U = I\sqrt{R^2 + X_L^2},$$

откуда

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}.$$



**Примечание.**

*Эта формула представляет собой выражение **закона Ома для цепи переменного тока**, содержащей активное и индуктивное сопротивления.*

Знаменатель в данном выражении обозначается  $Z$  и называется **полным сопротивлением** цепи:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}.$$



**Примечание.**

*Основываясь на этом равенстве, можно построить прямоугольный треугольник (рис. 4.14, в) с катетами  $R$  и  $X_L = \omega L$  и гипотенузой  $Z$ , называемый **треугольником сопротивлений** цепи, содержащей активное и индуктивное сопротивления.*

Из треугольника сопротивлений можно определить угол сдвига фаз  $\Psi$  между напряжением, приложенным к цепи, и током в ней:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}.$$

Зная  $R$  и  $Z$ , нетрудно по  $\cos \varphi$  определить угол  $\varphi$ .

### Емкость в цепи переменного тока

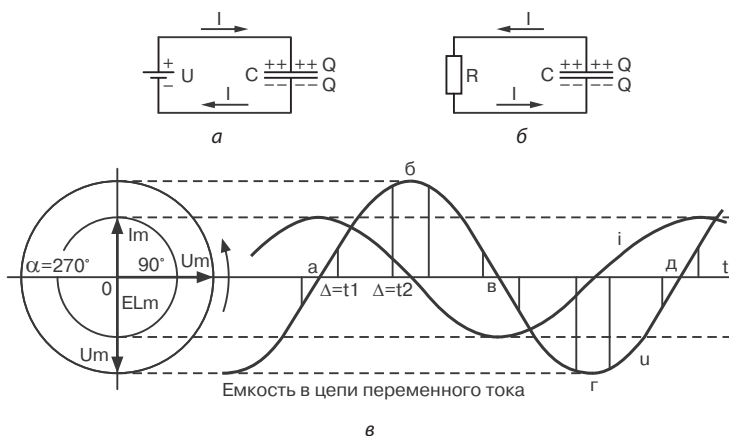
При включении конденсатора емкостью  $C$  (рис. 4.15, а) под постоянное напряжение  $U$  он заряжается, а на его обкладках сосредотачиваются равные, но противоположные по знаку количества электричества:  $Q = CU$ .

Если заряженный конденсатор отключить от источника тока, то он, сохраняя заряд, будет обладать некоторым напряжением  $U_c$ .

Соединив обкладки заряженного конденсатора между собой через какое-либо сопротивление  $R$  (рис. 4.15, б), можно убедиться (с помощью измерительного прибора) в том, что конденсатор, разряжаясь, дает кратковременный ток через сопротивление  $R$ .

Направление тока в цепи при разряде конденсатора противоположно направлению тока при заряде.

Если рассматривать процессы, происходящие в цепи, содержащей конденсатор и источник переменного тока с синусоидальным напря-



**Рис. 4.15.** Цепь, содержащая емкость:

а — заряд конденсатора; б — разряд конденсатора;  
в — векторная и волновая диаграммы напряжения и тока

жением  $u = U_m \sin \omega t$ , то нетрудно заметить, что эти процессы сводятся к периодическому заряду и разряду конденсатора.

Допустим, что генератор переменного тока замкнут на конденсатор. Представим изменение напряжения на зажимах генератора на временной диаграмме (рис. 4.15, в) в виде синусоидальной кривой абвгд, а вектор напряжения  $U_m$  на векторной диаграмме расположим горизонтально.

Обратимся к формуле  $Q = CU$  и применим ее к рассматриваемому нами случаю заряда конденсатора переменным током.

Очевидно, что за очень малый промежуток времени  $\Delta t$  напряжение на зажимах генератора изменится также на малую величину, которую обозначим  $\Delta u$ .

Вместе с тем за тот же промежуток времени  $\Delta t$  генератор отдает конденсатору количество электричества, равное  $\Delta Q$ .

Таким образом, наша формула для очень малого промежутка времени  $\Delta t$  может быть написана в виде  $\Delta Q = C \Delta u$ .

Деля обе части равенства на  $\Delta t$ , получим  $\Delta Q / \Delta t = C \Delta u / \Delta t$ .

Левая часть равенства представляет собой отношение количества электричества  $\Delta Q$ , перешедшего от генератора к конденсатору за время  $\Delta t$ , к этому времени.



#### Примечание.

*Следовательно, если  $\Delta Q$  выразить в кулонах, а  $\Delta t$  — в секундах, то отношение  $\Delta Q / \Delta t$  представит собой количество электричества, перенесенное в одну секунду и выраженное в кулонах, т. е. будет мгновенным значением тока  $i$ , выраженным в амперах.*

Значит, последнее равенство можем написать в виде  $i = C \Delta u / \Delta t$ .

Если напряжение синусоидально  $u = U_m \sin \omega t$ , то за время  $\Delta t$  оно изменится на величину  $\Delta u = U_m [\sin \omega(t + \Delta t) - \sin \omega t]$ .

В этом выражении  $\sin \omega(t + \Delta t) = \sin \omega t \cos \omega \Delta t + \sin \omega \Delta t \cos \omega t$ , и так как угол  $\omega \Delta t$  очень мал, то синус его равен дуге, а косинус — единице ( $\sin \omega \Delta t = \omega \Delta t$ ,  $\cos \omega \Delta t = 1$ ), на основании чего

$$\Delta u = U_m (\sin \omega t + \omega \Delta t \cos \omega t - \sin \omega t) \text{ и } \Delta u / \Delta t = U_m \omega \cos \omega t.$$

Следовательно, через емкость проходит переменный ток  $i = C \Delta u / \Delta t = U_m \omega C \cos \omega t = U_m \omega C \sin(\omega t + \pi/2)$ , т. е. ток синусоидален и опережает по фазе приложенное напряжение на четверть периода ( $\pi/2 = 90^\circ$ ).

Максимальное значение переменного тока можно выразить через емкость:

$$I_m = U_m \omega C.$$

Действующее значение тока в цепи, содержащей конденсатор:

$$I = (U_m / \sqrt{2}) \omega C = U \omega C = U / (1 / \omega C).$$

Полученная формула представляет собой выражение закона Ома для цепи переменного тока, обладающей емкостью.



#### Определение.

Величина  $1/\omega C$  называется **емкостным сопротивлением**, обозначается  $X_c$  и измеряется в омах, т. е.  $X_c = 1/\omega C$ .

### Цепь переменного тока, содержащая активное и емкостное сопротивление

Допустим, что по цепи (рис. 4.16, а), содержащей активное сопротивление  $R$  и конденсатор емкостью  $C$ , протекает переменный ток с угловой частотой  $\omega$  и действующим значением  $I$ .



#### Примечание.

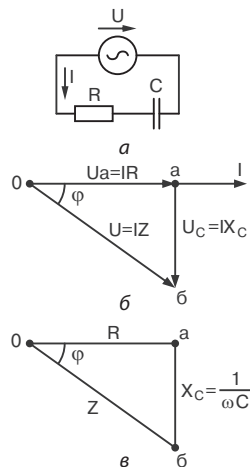
Для простоты будем считать, что начальная фаза тока равна нулю и ток изображается вектором  $I$  (рис. 4.16, б), расположенным горизонтально.

Ток  $I$ , проходя по активному сопротивлению  $R$ , создает падение напряжения:

$$U_a = IR.$$

Напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с током. Вектор напряжения  $U_a$ , как мы уже знаем, называется **активным падением напряжения**.

Рассматриваемая нами цепь, помимо активного сопротивления, обладает также и емкостным сопротивлением  $X_c = 1/\omega C$ . Поэтому ток  $I$ , проходя через конденсатор с



**Рис. 4.16.** Активное сопротивление и емкость в цепи переменного тока:

а — схема;  
б — векторная диаграмма напряжения и тока;  
в — треугольник сопротивлений

указанным емкостным сопротивлением  $X_c$ , создает еще напряжение  $U_c = IX_c$ .



### Определение.

Напряжение  $U_c$  называется **емкостным падением напряжения**.

Как мы уже знаем, напряжение на конденсаторе отстает по фазе от тока в нем на угол  $90^\circ$ . Поэтому на векторной диаграмме вектор напряжения  $U_c$  построен повернутым под углом  $90^\circ$  в сторону отставания (по часовой стрелке).

Следовательно, напряжение на зажимах цепи должно быть равно геометрической сумме векторов  $U_a$  и  $U_c$ .

Сложив эти векторы геометрически, получим вектор  $U$ , определяющий своей величиной и направлением действующее значение напряжения.

Вектор  $I$  опережает вектор  $U$  на некоторый угол, обозначенный нами  $\Psi$ . Кроме того, вектор  $U$  является гипотенузой прямоугольного треугольника  $OAb$ , называемого **треугольником напряжений**.

Катет треугольника  $Oa$  равен  $U_a = IR$ , а катет  $ab$  равен  $U_c = IX_c$ , т. е.

$$U^2 = U_a^2 + U_c^2 \text{ или } U^2 = (IR)^2 + (IX_c)^2 = I^2(R^2 + X_c^2).$$

Извлекая квадратный корень из обеих частей последнего равенства, находим:

$$U = I\sqrt{R^2 + X_c^2}, \text{ откуда } I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_c^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

Последняя формула представляет собой выражение **закона Ома для цепи переменного тока, содержащей активное и емкостное сопротивления**. Знаменатель в данном выражении, обозначаемый  $Z$ , называется **полным сопротивлением цепи**:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_c^2} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Основываясь на этом равенстве, мы можем построить прямоугольный треугольник (рис. 4.16, в) с катетами  $R$  и  $X_c = 1/\omega C$  и гипотенузой  $Z$ , называемый **треугольником сопротивлений** цепи, содержащей активное и емкостное сопротивления.

Из треугольника сопротивлений можем определить угол сдвига фаз  $\varphi$  между током в цепи и напряжением, приложенным к ней:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

### Цепь переменного тока, содержащая активное, индуктивное и емкостное сопротивления

Рассмотрим цепь переменного тока, состоящую из включенных последовательно: активного сопротивления  $R$  (рис. 4.17, а), индуктивности  $L$  и конденсатора емкостью  $C$ . Под действием приложенного напряжения  $U$  протекает ток  $I$ .

Напряжение  $U$  должно покрыть (компенсировать) падение напряжения на активном сопротивлении  $U_a = IR$ , на индуктивном сопротивлении  $U_L = I\omega L$  и на емкостном сопротивлении  $U_c = I/\omega C$ .

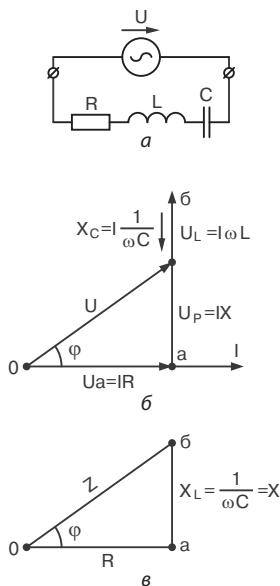
Построим векторную диаграмму для этих напряжений (рис. 4.17, б). Отложим ток  $I$  в виде горизонтального отрезка и по его направлению отложим активную составляющую напряжения  $U_a = IR$ , имея в виду, что она совпадает по фазе с током.

Так как индуктивная составляющая напряжения  $U_L$  опережает ток  $I$  по фазе на угол  $90^\circ$ , восстановим к направлению тока перпендикуляр и на нем отложим индуктивное падение напряжения  $U_L = I\omega L$  в виде отрезка аб.

Емкостное падение напряжения  $U_c$  отстает от тока  $I$  по фазе на угол  $90^\circ$ , поэтому из конца отрезка аб (из точки б) опустим к вектору тока перпендикуляр и на нем отложим  $U_c = I\omega C$  в виде отрезка бв.

Соединив теперь точки 0 и в, получим суммарный вектор  $0в$ , который своей величиной и направлением определит напряжение  $U$ , приложенное к рассматриваемой нами цепи.

Прямоугольный треугольник  $0ав$  называется **треугольником напряжений** для цепи,



**Рис. 4.17.** Активное сопротивление, индуктивность и емкость в цепи переменного тока:  
а — схема;  
б — векторная диаграмма;  
в — треугольник сопротивлений

содержащей активное, индуктивное и емкостное сопротивления, соединенные последовательно.

Катет  $ав$  представляет собой разность индуктивного  $U_L$  и емкостного  $U_C$  падения напряжения: Следовательно, можем написать такое равенство:

$$U^2 = U_A^2 + (U_L - U_C)^2,$$

или

$$U^2 = (IR)^2 + (I\omega L - I/\omega C)^2 = I^2[R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2],$$

откуда

$$U = I\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \text{ или } I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

Последняя формула представляет собой выражение закона Ома для цепи переменного тока, содержащей активное, индуктивное и емкостное сопротивления.

Знаменатель в этом выражении обозначается  $Z$  и называется **полным сопротивлением** цепи:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Основываясь на данном равенстве построим прямоугольный треугольник  $Оаб$  (рис. 4.17, в) с катетами  $R$  и  $\omega L - 1/\omega C$  и гипотенузой  $Z$ , называемый **треугольником сопротивлений** цепи, содержащей активное, индуктивное и емкостное сопротивления.

Из треугольника сопротивлений можем определить угол сдвига фаз (разность фаз) между напряжением и током в цепи:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

Рассмотрим частный случай последовательного включения активного, индуктивного и емкостного сопротивлений, когда разность сопротивлений  $X_L - X_C = \omega L - 1/\omega C$  равна нулю, т. е.  $\omega L - 1/\omega C = 0$ , или  $\omega L = 1/\omega C$ .

Решая уравнение относительно угловой частоты  $\omega$ , величину которой для этого случая обозначим  $\omega_0$ , найдем  $\omega_0^2 LC = 1$ , или

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Угловая частота  $\omega_0$  называется **резонансной угловой частотой**. При этой частоте ток в цепи определяется одним лишь активным сопротивлением  $R$ , т. е.  $I = U/R$  и достигает наибольшей величины.

Угол сдвига фаз между напряжением и током при резонансе становится равным нулю, так как  $\cos\varphi = 1$ , а именно:

$$\cos\varphi = R/R = 1.$$

Рассмотренный нами случай называется **резонансом напряжений**, так как при этом напряжения на зажимах конденсатора  $U_c$  и индуктивного сопротивления  $U_L$  могут значительно превышать напряжение, приложенное к цепи.

Напряжения  $U_L$  и  $U_c$  равны и сдвинуты по фазе на половину периода, т. е. в любой момент времени эти напряжения равны и противоположны по знаку.

Следовательно, в любой момент времени мгновенные мощности в реактивных участках также равны и противоположны по знаку, т. е. увеличение энергии магнитного поля в катушке индуктивности происходит в результате уменьшения энергии электрического поля конденсатора, и наоборот, а генератор расходует энергию на активное сопротивление.

## 4.4. Параллельное соединение реактивных сопротивлений. Резонанс токов. Мощность

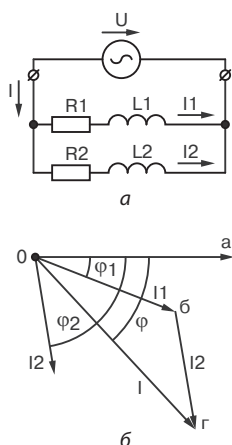
### Параллельное соединение реактивных сопротивлений. Резонанс токов

Допустим, что две параллельные ветви подключены к зажимам генератора переменного тока  $\Gamma$  (рис. 4.18, а) с напряжением  $U$ .

Одна ветвь обладает активным сопротивлением  $R_1$  и индуктивностью  $L_1$ , а другая — соответственно  $R_2$  и  $L_2$ .

Если угловая частота генератора —  $\omega$ , то полные сопротивления  $Z_1$  и  $Z_2$  первой и второй ветви равны:





**Рис. 4.18.** Параллельное соединение сопротивлений:  
а — схема;  
б — векторная диаграмма

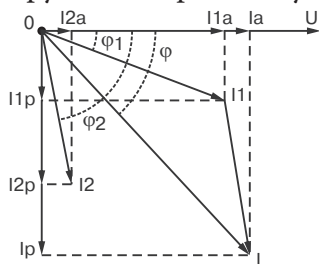
$\cos\varphi_1 = R_1/Z_1$ ;  $\cos\varphi_2 = R_2/Z_2$ . В соответствии с этим на рис. 4.18, б построена векторная диаграмма, на которой напряжение  $U$  показано в виде отрезка  $Oa$ , а токи  $I_1$  и  $I_2$  — в виде отрезков  $Ob$  и  $Ov$ .

Ток  $I$  в неразветвленной части цепи представляет собой геометрическую сумму токов  $I_1$  и  $I_2$ .

Поэтому для определения тока  $I$  на диаграмме токи  $I_1$  и  $I_2$  сложены геометрически. В результате указанного сложения получен вектор тока  $I$  в виде отрезка  $Og$ , который своей величиной и направлением, определяет величину и направление тока  $I$  в неразветвленной части цепи.

Угол  $\varphi$  является углом сдвига фаз между напряжением  $U$  и током  $I$ .

Величину тока  $I$  и угла сдвига фаз  $\varphi$  можно найти вычислением. Для этого каждый из токов  $I_1$  и  $I_2$  раскладывают на два слагаемых, из которых одно будет направлено по вектору напряжения  $U$  (рис. 4.19), а другое — перпендикулярно ему.



**Рис. 4.19.** Активное и реактивное составляющие токов

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2};$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}.$$

Токи  $I_1$  и  $I_2$  на основании закона Ома представляют собой следующие величины:

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}};$$

$$I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{U}{\sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}}.$$

Так как в каждой ветви, помимо активных сопротивлений, содержатся индуктивные сопротивления, то токи в ветвях отстают по фазе от напряжения  $U$  на углы  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , определяемые по их косинусам из равенства

Первое из указанных слагаемых называют активной составляющей тока, а второе — реактивной составляющей тока.

Обозначив составляющие тока  $I_1$  — активную  $I_{1A}$  и реактивную  $I_{1p}$ , а составляющие тока  $I_2$  — активную  $I_{2A}$  и реактивную  $I_{2p}$ , запишем:

$$I_{1A} = I_1 \cos\varphi_1; I_{1p} = I_1 \sin\varphi_1;$$

$$I_{2A} = I_2 \cos\varphi_2; I_{2p} = I_2 \sin\varphi_2.$$

Ток в неразветвленной части цепи:

$$I = \sqrt{(I_{1a} + I_{2a})^2 + (I_{1p} + I_{2p})^2} = \sqrt{I_a^2 + I_p^2},$$

где  $I_a = I_{1a} + I_{2a}$  и  $I_p = I_{1p} + I_{2p}$ .

Величины  $I_a$ ,  $I_p$  представляют собой соответственно активную и реактивную составляющие тока  $I$  в неразветвленной части цепи.

Косинус угла сдвига фаз  $\varphi$  между напряжением  $U$  и током  $I$  определится из равенства  $\cos\varphi = I_a/I$ .

Рассмотрим очень важный случай параллельного соединения двух ветвей, когда одна из них содержит активное сопротивление  $R$  и индуктивность  $L$ , а другая — конденсатор емкостью  $C$  (рис. 4.20, а).

Напряжение генератора  $\Gamma$ , приложенное к точкам а и б, равно  $U$  при угловой частоте  $\omega$ . Очевидно, что в ветви с индуктивностью ток

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

и отстает по фазе от напряжения  $U$  на угол  $\varphi_1$ .

В ветви с конденсатором ток

$$I_2 = U/(1/\omega C) = U\omega C.$$

Ток  $I_2$  опережает напряжение  $U$  по фазе на угол  $90^\circ$ , что показано на векторной диаграмме (рис. 4.20, б). По горизонтальной оси отложено напряжение в виде отрезка  $Oa$ .

Под углом  $\varphi_1$  в сторону отставания (по часовой стрелке от напряжения  $U$ ) построен отрезок  $Oб$ , на котором отложен ток  $I_1$ .

Затем под углом  $\varphi_2 = 90^\circ$  в сторону опережения (против часовой стрелки) от напряжения  $U$  построен отрезок  $Oв$  и на нем отложен ток  $I_2$ .

Сложив геометрически векторы токов  $I_1$  и  $I_2$ , получим вектор тока  $I$  в неразветвленной части цепи. Отрезок  $Oг$  определяет величину тока  $I$ , а угол  $\Psi$  — угол сдвига фаз между напряжением  $U$  и током  $I$  в неразветвленной части цепи.

Из этой диаграммы видно, что если бы не было ветви с конденсатором  $C$ , подключенной параллельно ветви с активным сопротивлением  $R$  и индуктивностью  $L$ , то ток в цепи равнялся бы  $I_1$ . Наличие же конденсатора  $C$  снизило ток в неразветвленной части цепи до величины  $I < I_1$ .

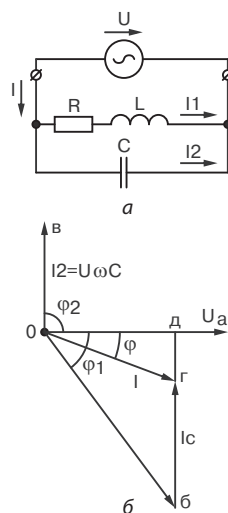


Рис. 4.20. Параллельное соединение индуктивности и емкости:  
а — схема; б — векторная диаграмма

Если подобрать емкость  $C$  так, чтобы  $0\text{в} = \text{бд}$ , т. е. чтобы  $U\omega C = I_1 \sin\varphi_1$ , то ток  $I$  в неразветвленной части цепи достигнет минимальной величины, а угол  $\omega$  станет равным нулю. Такой случай называется **резонансом токов**.

Так как при резонансе токов в неразветвленной части цепи ток имеет минимальную величину, то потери в соединительных проводах и в обмотках генератора переменного тока минимальны. Подключение конденсатора параллельно цепи, обладающей активным и индуктивным сопротивлениями, повышает  $\cos\varphi$ .

При параллельном соединении конденсатора емкостью  $C$  и катушки с индуктивностью  $L$  и малым активным сопротивлением, которым можно пренебречь ( $R = 0$ ), токи в ветвях будут определяться следующим образом:

- ♦ в ветви с индуктивностью  $I_L = U/\omega L$ ;
- ♦ в ветви с емкостью  $I_C = U/1/\omega C = U\omega C$ .

Подберем индуктивность  $L$  и емкость  $C$  так, чтобы токи  $I_L$  и  $I_C$  были равны, т. е. чтобы  $U/\omega L = U\omega C$ .

Отсюда определяем резонансную угловую частоту

$$\omega_0 = \frac{1}{LC}$$

и резонансную частоту

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{LC}.$$

В ветви с емкостью ток  $I_C$  опережает напряжение  $U$  по фазе на угол  $90^\circ$ , а в ветви с индуктивностью ток  $I_L$  отстает от напряжения  $U$  по фазе на угол  $90^\circ$ .

Ток  $I$  в неразветвленной части цепи равен нулю, так как токи  $I_C$  и  $I_L$ , одинаковые по величине, направлены противоположно. **При идеальном резонансе** ток в неразветвленной части цепи равен нулю, тогда входное сопротивление цепи, состоящей из параллельно соединенных индуктивности и емкости, равно бесконечно большой величине.

Если конденсатор зарядить до некоторого напряжения  $U$  и замкнуть на индуктивную катушку (рис. 4.21, а), то в замкнутом контуре возникнет ток, и конденсатор будет разряжаться через катушку.

При этом электрическая энергия, запасенная в конденсаторе, будет переходить в энергию магнитного поля катушки.

В начальный момент, когда напряжение на конденсаторе велико, ток и магнитное поле катушки возрастают быстро.

В индуктивности возникает ЭДС самоиндукции  $E_L$ , «уравновешивающая» напряжение  $U$  на конденсаторе.

В процессе разряда конденсатора напряжение на нем понижается. В момент, когда напряжение уменьшится до нуля, ток в контуре достигнет максимального значения, т. е. магнитное поле катушки станет наибольшим.

Затем ток в цепи начнет уменьшаться, и ЭДС самоиндукции, изменив направление, будет заряжать конденсатор (с противоположной полярностью) до наибольшего значения ЭДС самоиндукции, соответствующего моменту, когда ток уменьшится до нуля.

При этом энергия магнитного поля катушки вновь вернется к конденсатору. Затем опять начнется разряд конденсатора, но направление тока разряда будет противоположно «начальному», так как напряжение на конденсаторе изменило полярность.

Таким образом, в цепи происходит процесс периодического изменения тока и напряжения с резонансной частотой (рис. 4.21, б):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{LC}.$$

Такая цепь называется **колебательным контуром**.

Ток в контуре и напряжение на нем с течением времени уменьшаются, так как помимо реактивных сопротивлений в цепи имеется и активное сопротивление провода, который является обмоткой индуктивной катушки.

В активном сопротивлении провода выделяется энергия, преобразующаяся в тепло и нагревающая провод. Поэтому энергия, запасенная в конденсаторе и переходящая в энергию магнитного поля индуктивной катушки, а затем обратно в конденсатор, с каждым периодом постепенно убывает, что приводит к затуханию колебаний.

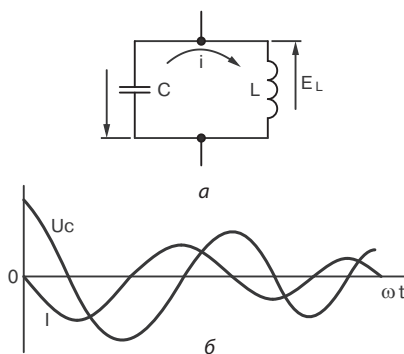


Рис. 4.21. Колебательный контур: а — схема; б — временная диаграмма

## 4.5. Вопросы для тестирования

### Вопрос №1.

В цепи, схема которой показана на рис. 4.24, ключ К сначала замкнут. Параметры цепи:  $r = 2,5 \text{ Ом}$ ,  $R = 100 \text{ Ом}$ ,  $L = 0,1 \text{ Гн}$ ,  $U = 10 \text{ В}$ . В некоторый момент времени ключ размыкают. Чему равна разность потенциалов точек с и d в момент размыкания ключа?

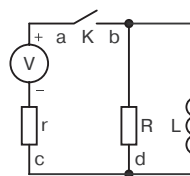


Рис. 4.24. Схема цепи для вопроса №1

- а) 220 В; б) 410 В; в) 300 В; г) 400 В.

### Вопрос №2.

Соленоид, индуктивность которого равна  $L$ , подключают к батарее с ЭДС  $E$ . Чему будет равен ток  $I$  через соленоид через время  $t$ , если пренебречь сопротивлением соленоида, батареи и подводящих проводов?

- а)  $I = 0$ ; б)  $I = E/L$ ; в)  $I = Et/L$ ; г)  $I = Et/2L$ .

### Вопрос №3.

Чему равен угол сдвига фаз между напряжением и током в емкостном элементе?

- а) 0; б)  $90^\circ$ ; в)  $-90^\circ$ ; г)  $45^\circ$ .

### Вопрос №4.

В цепи с последовательно соединенными резистором  $R$  и емкостью  $C$  определить реактивное сопротивление  $X_C$ , если вольтметр показывает входное напряжение  $U = 200 \text{ В}$ , ваттметр  $P = 640 \text{ Вт}$ , амперметр  $I = 4 \text{ А}$ .

- а) 20 Ом; б) 50 Ом; в) 40 Ом; г) 30 Ом.

### Вопрос №5.

Какой прибор используется для измерения активной мощности потребителя?

- а) Вольтметр; б) ваттметр; в) омметр; г) мегомметр.

### Вопрос №6.

В каких единицах выражается индуктивность  $L$ ?

- а) Генри; б) фарад; в) кельвин; г) вольт.

**Вопрос №7.**

Мгновенные значения тока и напряжения в нагрузке заданы следующими выражениями:

$$I = 0,2\sin(376,81 + 80^\circ) \text{ А}, U = 250\sin(376,81 + 170^\circ) \text{ В}.$$

Определить тип нагрузки.

- а) Активная; б) активно-индуктивная; с) активно-емкостная;  
г) индуктивная.

**Вопрос №8.**

В каких единицах выражается реактивная мощность потребителей?

- а) ВАр; б) Дж; в) В; г) кВт.

**Вопрос №9.**

В электрической цепи с последовательно включенными активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью наблюдается резонанс. Как он называется?

- а) Резонанс токов; б) резонанс напряжений; в) резонанс мощностей;  
г) резонанс сопротивлений.

**Вопрос №10.**

В электрической цепи переменного тока, содержащей только активное сопротивление  $R$ , электрический ток:

- а) ... отстает по фазе от напряжения на 90 градусов; б) ... опережает по фазе напряжение на 90 градусов; в) ... совпадает по фазе с напряжением; г) ... опережает по фазе напряжение на 40 градусов.

## ПЯТЫЙ ШАГ

# ПРИШЛА ПОРА ИЗУЧИТЬ ТРЕХФАЗНЫЙ ТОК



*Сделав ПЯТЫЙ шаг, вы познакомитесь с трехфазным током, который экономичнее однофазного. Вы будешь знать, что такое трехфазные генераторы, как нужно производить соединение обмоток, включать нагрузки в сеть трехфазного тока. Рассмотрите мощность трехфазной цепи, вращающееся магнитное поле. И в завершении — ответите на вопросы для самотестирования.*

## 5.1. Трехфазные генераторы. Соединение обмоток

### Работа трехфазные генераторы

Ранее рассмотрены свойства однофазного переменного тока. Однако однофазная система неэкономична вследствие несовершенства однофазных электрических машин.

Так, например, при одинаковых габаритах, массе активных материалов (стали и меди) и потерях энергии мощность однофазной машины в 1,5 раза меньше мощности трехфазной машины. Поэтому для электрификации используется трехфазная система переменного тока.



#### Определение.

*Трехфазной системой переменного тока или просто трехфазной системой называется цепь или сеть переменного тока, в которой действуют три ЭДС одинаковой частоты, но взаимно смещенные по фазе на одну треть периода.*



#### Определение.

*Отдельные цепи, составляющие трехфазную систему, называются фазами.*

**Определение.**

*Если ЭДС во всех трех фазах имеют одинаковую амплитуду и сдвинуты по фазе на одинаковый угол, то такая система называется симметричной.*

Впервые в мире передача энергии трехфазным током была осуществлена русским ученым М. О. Доливо-Добровольским в 1891 г.

На рис. 5.1 показана схема устройства простейшего двухполюсного трехфазного генератора. В пазах статора (неподвижная часть машины) расположены катушки А–Х, В–У и С–Z, оси которых сдвинуты в пространстве на одну треть окружности ( $120^\circ$ ).

Внутри статора помещается ротор (вращающаяся часть машины), представляющий собой двухполюсный электромагнит, питаемый постоянным током, возбуждающим магнитное поле.

Ротор приводится во вращение каким-либо двигателем. Магнитное поле, вращаясь вместе с ротором, пересекает проводники катушек, заложенных в пазах статора, и индуцирует в этих катушках ЭДС, изменяющиеся синусоидально.

Однако синусоиды ЭДС фаз  $e_A$ ,  $e_B$  и  $e_C$  будут сдвинуты одна по отношению к другой на  $1/3$  периода.

На рис. 5.2 показаны кривые изменения ЭДС в катушках А–Х, В–У и С–Z и положения ротора, соответствующие положительному максимуму ЭДС  $E_m$  в этих катушках.

Пусть положительный максимум ЭДС  $E_m$  в катушке А–Х наступает в момент, когда сторона А окажется против центра северного полюса, а сторона Х — против центра южного полюса.

Положительный максимум ЭДС  $E_m$  в катушке В–У наступит в тот момент, когда центр северного полюса окажется под проводником В. Для этого ротор должен повернуться на  $2/3$  окружности ( $120^\circ$ ), что соответствует промежутку времени, равному  $2\pi/3$  периода.

Положительный максимум ЭДС  $E_m$  в катушке С–Z наступит через  $1/3$  периода после такого же максимума в катушке В–У, что соответствует дальнейшему повороту ротора на  $V_s$  окружности.

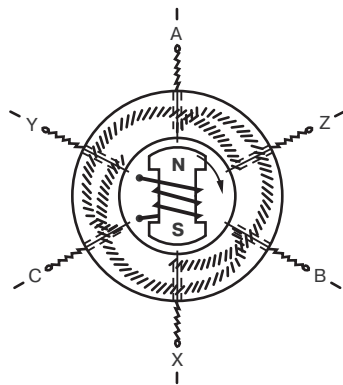


Рис. 5.1. Схема устройства простейшего трехфазного генератора



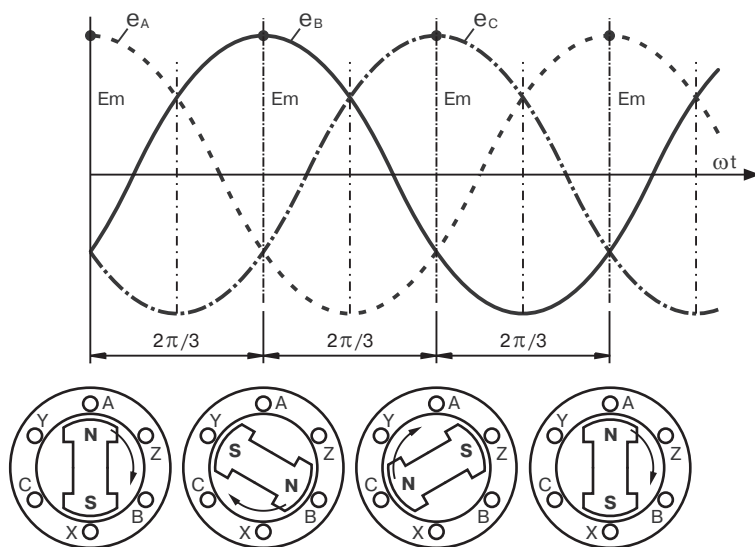


Рис. 5.2. Кривые изменения ЭДС в трехфазной обмотке генератора



#### Примечание.

При нагрузке генератора на зажимах катушек А–Х, В–У и С–Z устанавливаются напряжения, называемые **фазными**.

Если нагрузка отсутствует (холостой ход), фазные напряжения равны ЭДС, индуцируемым в катушках статора (рис. 5.3).

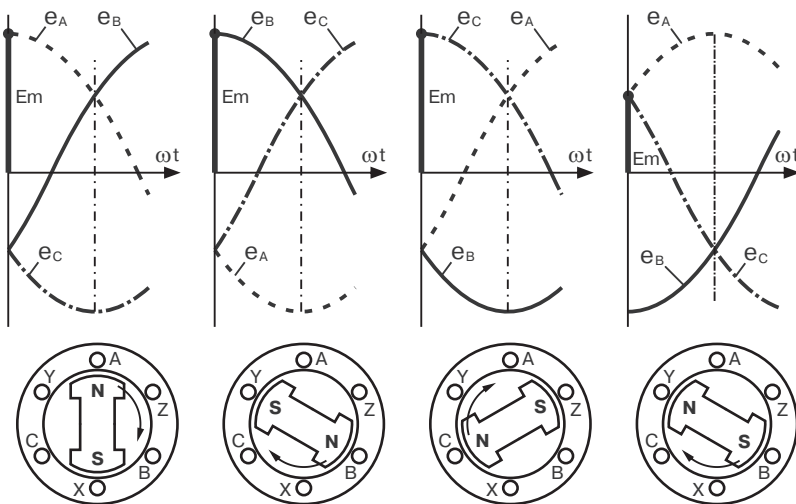
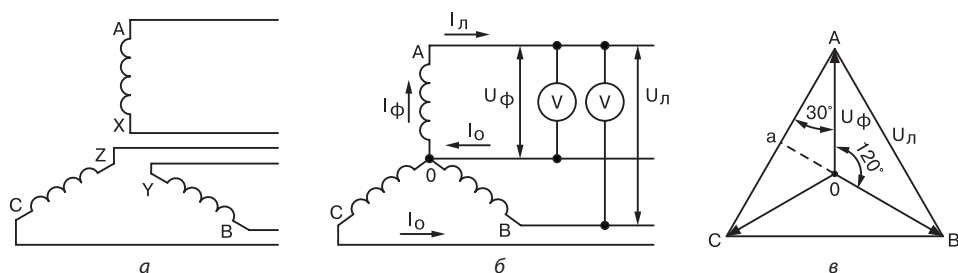


Рис. 5.3. Положения ротора при работе генератора

### Соединение обмоток генератора

В трехфазном генераторе (рис. 5.1) с тремя независимыми однофазными цепями их электродвижущие силы имеют одинаковые амплитуды и сдвинуты по фазе на  $1/3$  периода.

К каждой паре зажимов обмотки статора генератора можно подключить провода, подводящие ток к нагрузке, и получить несвязанную трехфазную систему (рис. 5.4, а).



**Рис. 5.4.** Соединение звездой и несвязанная трехфазная система:  
а — несвязанная трехфазная система; б — соединение обмоток генератора звездой;  
в — векторная диаграмма

Обмотки генератора соединяют между собой в звезду или в треугольник.

При соединении обмоток генератора звездой (рис. 5.4, б) концы всех трех фаз соединяют в общую точку  $O$ , а к началам подсоединяют провода, отводящие энергию в сеть.



#### Примечание.

Эти три провода называются **линейными**, а напряжение между любыми двумя линейными проводами — **линейным напряжением**  $U_L$ .



#### Примечание.

От общей точки соединения концов (или начал) трех фаз (от нулевой точки звезды) может быть отведен четвертый провод, называемый **нулевым**.

Напряжение между любым из трех линейных проводов и нулевым проводом равно напряжению между началом и концом одной фазы, т. е. **фазному напряжению**  $U_\phi$ .

Обычно все фазы обмотки генератора выполняются одинаковыми, так что действующие значения ЭДС в фазах равны, т. е.  $E_A = E_B = E_C$ .

Если в цепь каждой фазы генератора включить нагрузку, то по этим цепям будут проходить токи.

В случае одинакового по величине и характеру сопротивления всех трех фаз приемника, т. е. при равномерной нагрузке, токи в фазах будут равны по величине и сдвинуты по фазе относительно своих напряжений на один и тот же угол  $\varphi$ .

Как максимальные, так и действующие значения фазных напряжений при равномерной нагрузке равны, т. е.  $U_A = U_B = U_C$ .

Эти напряжения сдвинуты по фазе на  $120^\circ$ , как показано на векторной диаграмме (рис. 5.4, в). Напряжения между любыми точками схемы (рис. 5.4, б) соответствуют векторам (рис. 5.4, в) между теми же точками.

Так, например, напряжение между точками А и О схемы (фазное напряжение  $U_A$ ) соответствует вектору А–О диаграммы, а напряжение между линейными проводами А и В схемы — вектору линейного напряжения А–В диаграммы.

По векторной диаграмме легко установить соотношение между линейным и фазным напряжениями.

Из треугольника АОа можно записать следующее соотношение:

$$\frac{1}{2}U_{\text{л}} = U_{\text{ф}} \cos 30^\circ = U_{\text{ф}} \frac{\sqrt{3}}{2}, \text{ откуда}$$

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}} \text{ или } U_{\text{ф}} = \frac{1}{\sqrt{3}}U_{\text{л}}.$$

Т. е. при соединении обмоток симметричного генератора звездой линейное напряжение в  $\sqrt{3} = 1,73$  раза больше фазного.

Из схемы (рис. 5.4, б) видно, что при соединении обмоток генератора звездой ток в линейном проводе равен току в фазах генератора, т. е.  $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$ .

На основании первого закона Кирхгофа ток в нулевом проводе равен геометрической сумме токов в фазах генератора  $\vec{I}_O = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C$ .

При равномерной нагрузке токи в фазах генератора равны между собой и сдвинуты по фазе на  $1/3$  периода. Геометрическая сумма токов трех фаз в таком случае равна нулю, т. е. в нулевом проводе тока не будет.

Поэтому при симметричной нагрузке нулевой провод может отсутствовать.

При несимметричной нагрузке ток в нулевом проводе не равен нулю. Обычно нулевой провод имеет меньшее поперечное сечение, чем линейные провода.

При соединении обмоток генератора треугольником (рис. 5.5, а) начало каждой фазы соединяется с концом другой фазы. Таким образом, три фазы генератора образуют замкнутый контур.



**Примечание.**

Так как ЭДС в фазах генератора равны и сдвинуты на  $1/3$  периода по фазе, то геометрическая сумма их равна нулю и, следовательно, в замкнутом контуре трехфазной системы, соединенной треугольником, никакого тока при отсутствии внешней нагрузки не будет.

Линейные провода при соединении треугольником подключаются к точкам соединения начала одной фазы и конца другой. Напряжение между линейными проводами равно напряжению между началом и концом одной фазы.

Таким образом, при соединении обмоток генератора треугольником линейное напряжение равно фазному, т. е.  $U_{\text{л}} = U_{\text{ф}}$ .

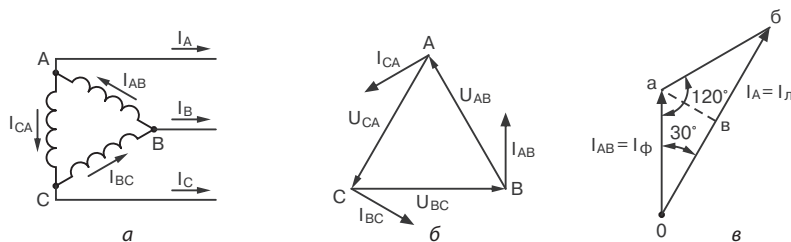
При равномерной нагрузке в фазах обмоток генератора проходят равные токи, сдвинутые относительно фазных напряжений на одинаковые углы  $\phi$ , т. е.

$$I_{\text{AB}} = I_{\text{BC}} = I_{\text{CA}}.$$

Векторная диаграмма фазных напряжений и токов изображена на (рис. 5.5, б).

Приняв направление фазных и линейных токов за положительное, которое указано на рис. 5.5, а, на основании первого закона Кирхгофа для мгновенных значений токов можно написать следующие выражения:

$$i_{\text{A}} = i_{\text{AB}} - i_{\text{CA}}; i_{\text{B}} = i_{\text{BC}} - i_{\text{AB}}; i_{\text{C}} = i_{\text{CA}} - i_{\text{BC}}.$$



**Рис. 5.5. Соединение треугольником:**

- а — схема соединения обмоток генератора треугольником;
- б — векторные диаграммы напряжений и токов в фазах;
- в — векторная диаграмма фазовых и линейных токов

Так как токи синусоидальны, заменим алгебраическое вычитание мгновенных значений токов геометрическим вычитанием векторов, изображающих действующие значения токов:

$$\vec{I}_A = \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{CA}; \vec{I}_B = \vec{I}_{BC} - \vec{I}_{AB}; \vec{I}_C = \vec{I}_{CA} - \vec{I}_{BC}.$$

Ток  $I_A$  линейного провода А определится геометрической разностью векторов фазных токов  $\vec{I}_{AB}$  и  $\vec{I}_{CA}$ .

Для построения вектора линейного тока  $\vec{I}_A$  изобразим вектор фазного тока  $\vec{I}_{AB}$  на (рис. 5.5, в) в виде отрезка Оа, а из точки а построим вектор  $-\vec{I}_{CA}$  (отрезок аб), равный и противоположно направленный вектору  $\vec{I}_{CA}$  (рис. 5.5, б).

Вектор, соединяющий начало вектора  $\vec{I}_{AB}$  (точка О) с концом вектора  $\vec{I}_{CA}$  (точка б), является **вектором линейного тока  $\vec{I}_A$** .

Аналогично могут быть построены векторы линейных токов  $\vec{I}_B$  и  $\vec{I}_C$ .

Из векторной диаграммы, показанной на рис. 5.5, в, легко определить соотношение между линейными и фазными токами при соединении обмоток генератора в треугольник.

Из треугольника Оав можно записать:

$$\frac{1}{2}I_L = \frac{I_\Phi}{\cos 30^\circ} = I_\Phi \frac{\sqrt{3}}{2}, \text{ откуда } I_L = \sqrt{3}I_\Phi = 1,73I_\Phi,$$

т. е. при соединении обмоток генератора в треугольник линейный ток в  $\sqrt{3}$  раз больше фазного (при равномерной нагрузке).

## 5.2. Включение нагрузки в сеть трехфазного тока

### Включение нагрузки звездой

В предыдущем разделе было отмечено, что трехфазный ток передается четырех- или трехпроводной системой переменного тока. Потребители энергии могут быть включены в сеть по схеме «звезда» и по схеме «треугольник».

Приемники энергии, включенные в четырехпроводную систему звездой (рис. 5.6), одним проводом подсоединены к линейному проводу, а другим — к нулевому.

Выше мы установили, что при соединении обмоток в звезду в случае равномерной нагрузки соотношения между линейными и фаз-

ными значениями напряжений и токов таковы:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}} \text{ и } I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}.$$

Ток нулевого провода, равный геометрической сумме токов трех фаз, т. е.  $\vec{I}_0 = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C$ , при равномерной нагрузке равен нулю.

Следовательно, в нулевом проводе ток проходить не будет, и надобность в нем отпадает.

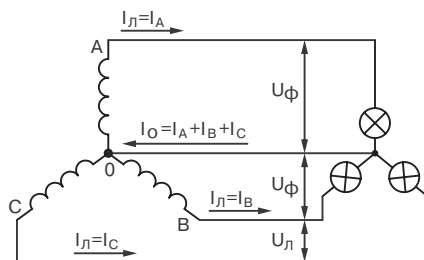


Рис. 5.6. Схема четырехпроводной системы



### Вывод.

Поэтому трехфазные двигатели переменного тока при равномерной нагрузке включаются в сеть звездой без нулевого провода.



### Внимание.

При неравномерной нагрузке ток в нулевом проводе не равен нулю, поэтому он обязателен в четырехпроводной системе, хотя его и выполняют обычно с меньшим, чем линейные провода, поперечным сечением.

При отсутствии нулевого провода или его обрыва при неравномерной нагрузке возникает резкое изменение напряжения на фазах приемника.

Так, если в фазе А нагрузки нет, а в фазах В и С нагрузки одинаковы, то при отсутствии нулевого провода нагрузки в фазах В и С окажутся включенными последовательно на линейное напряжение, которое равномерно распределится между ними (из условия равенства нагрузки).

Следовательно, сопротивление нагрузок в фазах В и С окажется под напряжением, равным половине линейного напряжения (рис. 5.7), т. е.

$$U_B = U_C = \frac{U_{\text{л}}}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{\text{ф}}.$$

Нейтральная точка звезды сместится в точку О так, что напряжение фазы А нагрузки окажется равным  $U_A = 1,5 U_{\text{ф}}$ .

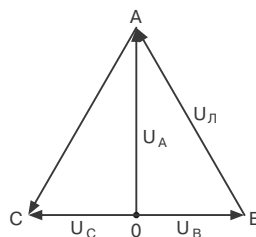


Рис. 5.7. Векторная диаграмма напряжений при неравномерной нагрузке и отсутствии нулевого провода

**Внимание.**

Таким образом, отключение нулевого провода при неравномерной нагрузке недопустимо. Поэтому нулевой провод выполняется всегда «глухим», т. е. в нем не устанавливают предохранителей, выключателей и т. д.

**Включение нагрузки треугольником**

При включении приемников в сеть трехфазного тока по схеме «треугольник» каждая группа сопротивлений включается между двумя линейными проводами (рис. 5.8).

Как выше было установлено, соотношения между линейными и фазными значениями напряжений и токов при соединении приемников энергии в треугольник таковы при равномерной нагрузке:

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}} \text{ и } I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}.$$

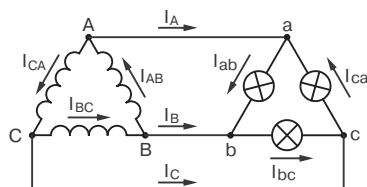


Рис. 5.8. Схема включения обмоток генератора и приемников в треугольник

**Примечание.**

Очень ценным свойством четырехпроводной системы является возможность получения двух различных напряжений.

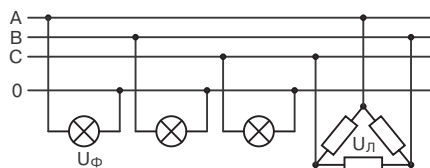


Рис. 5.9. Схема включения потребителей электроэнергии в четырехпроводную сеть на фазное и линейное напряжения

Включив приемники энергии между линейными проводами и нулевым проводом, соединяют их в звезду (рис. 5.9). Эти приемники окажутся включенными на фазное напряжение.

Другую группу приемников соединим в треугольник так, что они

будут включены только между линейными проводами и окажутся под линейным напряжением, большим в  $\sqrt{3}$  раз фазного.

Четырехпроводная система широко используется для электроснабжения смешанных осветительно-силовых нагрузок. Осветительные нагрузки включаются на фазное напряжение, а силовые нагрузки (электродвигатели) — на линейное.

Для трехфазных систем справедливы соотношения, выведенные для однофазного переменного тока,  $I_{\text{ф}} = U_{\text{ф}}/Z_{\text{ф}}$ ;  $\cos \varphi = R_{\text{ф}}/Z_{\text{ф}}$ , где  $U_{\text{ф}}$ ,

$Z_{\phi}$ ,  $R_{\phi}$  — соответственно, напряжение, полное и активное сопротивления рассматриваемой фазы.

### Защита трехфазной сети предохранителями

Защита трехфазной сети от токов короткого замыкания и перегрузки осуществляется плавкими предохранителями, включенными в линейные провода (рис. 5.10).

Если от трехфазной сети имеется ответвление в виде однофазной двухпроводной линии, предохранители устанавливают в каждый токопроводящий провод. Проверку исправности и обнаружение поврежденного предохранителя производят контрольной лампой или неоновым индикатором.

В первом случае один конец контрольной лампы подключают к нулевому проводу и щупом дотрагиваются до контактов а, б и в. Если лампа каждый раз будет загораться, то напряжение есть во всех фазах.

Дотрагиваясь щупом до контактов г, д, е, проверяют предохранители в фазах А, В, С. Если при подключении щупа к какому-либо контакту лампа не загорается, значит неисправен предохранитель в этой фазе. Такой предохранитель необходимо заменить.

Проверку предохранителей с помощью неоновых индикаторов (рис. 5.11) производят аналогичным образом.

Для проверки предохранителей индикатор берут в руки так, чтобы один из пальцев касался контактного лепестка (это необходимо для создания цепи, проходящей через емкость, образованную между человеческим телом и землей). Щупом дотрагиваются сначала до контактов а, б, в, а затем до контактов г, д, е предохранителя.

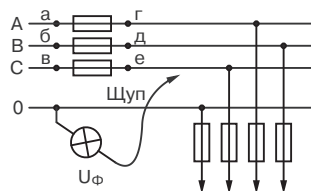


Рис. 5.10. Схема проверки исправности предохранителей контрольной лампой

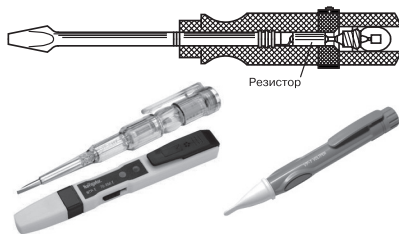


Рис. 5.11. Индикаторы



#### Примечание.

Если лампа индикатора не загорается при касании щупом какого-либо контакта, то предохранитель в данной фазе неисправен и должен быть заменен.



Если приемники энергии включены на фазные напряжения (между линейным и нулевым проводами), то при перегорании линейного предохранителя отключится нагрузка в одной фазе. Тогда как в двух других фазах нагрузки они будут оставаться под фазным напряжением, и будут работать нормально.

При включении потребителей на линейное напряжение (между линейными проводами) в трех- или четырехпроводную трехфазную сеть перегорание линейного предохранителя приведет к последовательному включению двух приемников на линейное напряжение. И напряжение на каждом приемнике окажется меньше номинальной величины.

Линейные напряжения в трехфазных сетях отличаются от фазных в  $\sqrt{3} = 1,73$  раза. Определять фазные и линейные напряжения можно без вольтметра с помощью контрольной лампы небольшой мощности (15—25 Вт).

Такие лампы выдерживают значительные кратковременные перенапряжения и взрывобезопасны. Обычно контрольные лампы выбирают на номинальное напряжение 220 В.

### 5.3. Мощность трехфазной цепи. Вращающееся магнитное поле

#### Мощность трехфазной цепи

Мощность, потребляемая нагрузкой от сети трехфазного тока, равна сумме мощностей в отдельных фазах, т. е.

$$P = P_A + P_B + P_C.$$

При равномерной нагрузке мощность, потребляемая каждой фазой,  $P_\phi = U_\phi I_\phi \cos\varphi$ , где  $U_\phi$  — фазное напряжение;  $I_\phi$  — фазный ток;  $\cos\varphi$  — коэффициент мощности нагрузки.

Мощность, потребляемая всеми тремя фазами

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos\varphi.$$

При соединении приемников энергии в звезду соотношения между линейными и фазными значениями напряжений и токов такие:

$$U_L = \sqrt{3}U_\phi \text{ и } I_L = I_\phi.$$

Следовательно, мощность, потребляемая нагрузкой от трехфазной сети

$$P = 3 \left( \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \right) I_{\text{л}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi.$$

При соединении приемников энергии в треугольник соотношения между линейными и фазными значениями напряжений и токов такие:

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}} \text{ и } I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}.$$

Следовательно, мощность, потребляемая нагрузкой

$$P = 3 U_{\text{л}} \left( \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \right) \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi.$$

Таким образом, при равномерной нагрузке мощность, потребляемая от трехфазной сети, независимо от способа включения нагрузки, выражается следующей формулой:

$$P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi.$$

Для измерения мощности применяют специальные измерительные приборы, называемые **ваттметрами**.

При симметричной или равномерной нагрузке мощность, потребляемая от трехфазной системы, может быть определена одним однофазным ваттметром.

В четырехпроводной системе (с нулевым проводом) токовая обмотка ваттметра включается последовательно в один из линейных проводов, а обмотка напряжения — между теми же линейным и нулевым проводами (рис. 5.12, а).

При таком включении ваттметр показывает мощность в одной фазе  $P_{\text{ф}}$ . Так как при равномерной нагрузке мощности фаз одинаковы, то суммарная мощность трехфазной системы составляет

$$P = 3 P_{\text{ф}}.$$

При несимметричной нагрузке одного ваттметра для определения мощности трехфазной системы недостаточно. В четырехпроводной системе необходимо применение

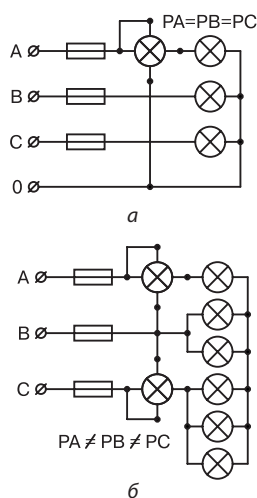


Рис. 5.12. Подключение ваттметров:

а — в четырехпроводной системе;  
б — в трехпроводной системе

трех ваттметров: обмотки напряжений которых включаются между нулевым и соответствующим линейным проводами.

Каждый ваттметр измеряет мощность одной фазы. Мощность трехфазной системы равна сумме показаний трех ваттметров, т. е.

$$P = P_1 + P_2 + P_3.$$

В трехпроводной системе при несимметричной нагрузке наиболее часто используют схему двух ваттметров (рис. 5.12, б), которая не может быть применена в четырехпроводной системе.

В схеме двух ваттметров обмотки напряжений каждого ваттметра соединены с входным зажимом обмотки тока и линейным проводом, оставшимся свободным. Полная мощность трехфазной системы равна сумме показаний ваттметров, т. е.

$$P = P_1 + P_2.$$



**Примечание.**

*При больших углах сдвига фаз между напряжением и током показания одного из ваттметров могут оказаться отрицательными, и для измерения мощности следует изменить направление тока в обмотке, переключив ее.*

В этом случае суммарная мощность равна разности показаний ваттметров, т. е.

$$P = P_1 - P_2.$$

Энергия в трехфазной системе измеряется как однофазными, так и трехфазными счетчиками электрической энергии. Однофазные счетчики включают в трехфазную сеть так же, как и ваттметры.

**Трехфазные счетчики** состояются из двух или трех однофазных счетчиков, размещенных в одном корпусе и имеющих общий счетный механизм. Они называются, соответственно, **двухэлементными** и **трехэлементными**:

- ♦ в трехпроводной системе (без нулевого провода) применяют двухэлементные счетчики;
- ♦ в четырехпроводной системе (с нулевым проводом) применяют трехэлементные счетчики.

Схема включения счетчика электрической энергии указывается на съемной крышке, которой закрывается панель зажимов.

### Вращающееся магнитное поле

Действие многофазной машины переменного тока основано на использовании вращающегося магнитного поля. Вращающееся магнитное поле создает любая многофазная система переменного тока, т. е. система с числом фаз две, три и т. д.

Выше было отмечено, что наибольшее распространение получил трехфазный переменный ток. Поэтому рассмотрим вращающееся магнитное поле трехфазной обмотки машины переменного тока.

На рис. 5.13, *а* и *б* показана простейшая трехфазная обмотка, включенная в сеть трехфазного тока. В статоре, собранном из листовой стали, как это делается во всех машинах переменного тока, расположены три обмотки, оси которых сдвинуты взаимно на угол  $120^\circ$ .

Каждая обмотка для наглядности изображена состоящей из одного витка, находящегося в двух пазах статора. В действительности обмотки имеют большое число витков. Буквами А, В, С обозначены

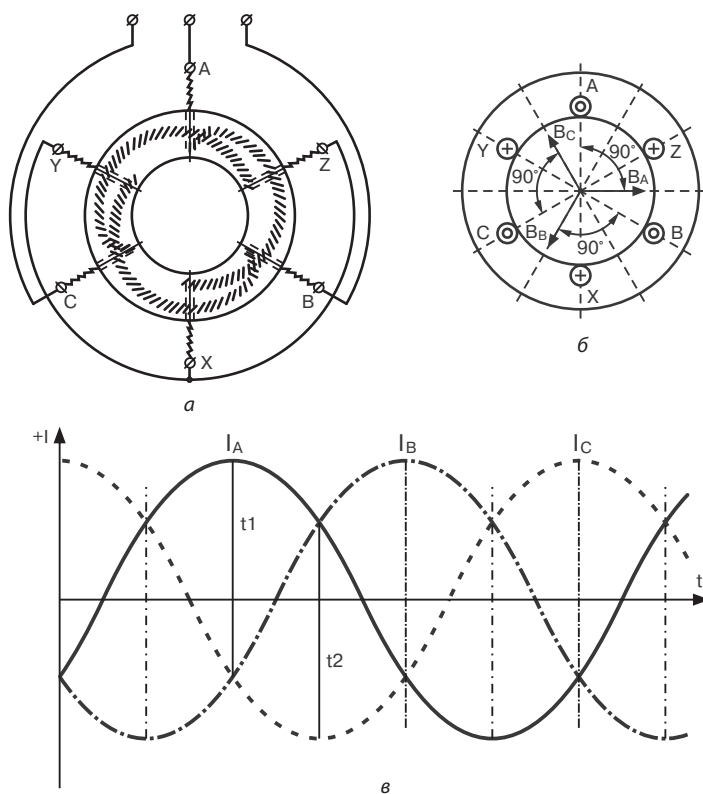


Рис. 5.13. Простейшая трехфазная обмотка:  
а — схема; б — разрез; в — кривые изменения токов в фазах

начала обмоток, а буквами X, Y, Z — их концы. Обмотки соединяют звездой или треугольником.

По обмоткам проходят синусоидальные токи с одинаковыми амплитудами ( $I_m$ ) и одинаковой частотой ( $\omega$ ) фазы которых смещены на  $1/3$  периода (рис. 5.13, в). Токи, проходящие в катушках, возбуждают переменные магнитные поля, которые пронизывают обмотки в направлении, перпендикулярном их плоскостям.

Следовательно, средняя магнитная линия или ось магнитного поля, создаваемого катушкой А – X, направлена под углом  $90^\circ$  к плоскости этой катушки (рис. 5.13, б). Направления магнитных полей всех трех катушек показаны векторами Ва, Вв и Вс, сдвинутыми друг относительно друга также на  $120^\circ$ .



#### Примечание.

*Условимся считать положительными направления токов в катушках от начала к концу обмотки каждой фазы.*

При этом в проводниках статора, подключенных к начальным точкам А, В и С, токи будут направлены на зрителя, а в проводниках, подключенных к конечным точкам X, Y, Z — от зрителя.

Положительным направлениям токов соответствуют положительные направления магнитных полей, показанные на том же рис. 5.13, б и определяемые по правилу буравчика.

Направление результирующего магнитного поля, созданного трехфазной обмоткой, для различных моментов времени определим следующим образом. В момент времени  $t = 0$  ток в обмотке А–Х равен нулю, в обмотке В – У — отрицателен, в обмотке С–Z — положителен.

Следовательно, в этот момент тока в проводниках А и Х нет, в проводниках С и Z он имеет положительное направление, в проводниках В и У — отрицательное направление (рис. 5.14, а).

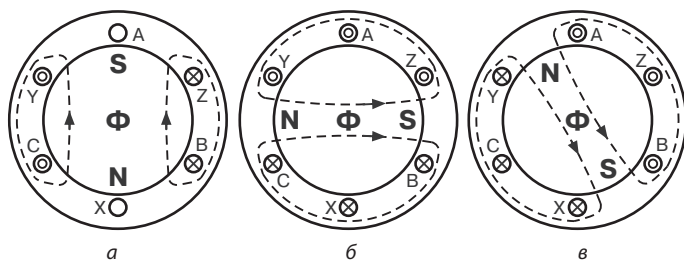


Рис. 5.14. Магнитное поле трехфазной обмотки в различные моменты времени:  $t = 0$  (а);  $t = t_1$  (б);  $t = t_2$  (в)

Таким образом, в выбранный нами момент  $t = 0$  в проводниках С и У ток направлен на зрителя, а в проводниках В и Z — от зрителя.

**Примечание.**

*При таком направлении тока согласно правилу буравчика созданное магнитное поле направлено снизу вверх. В нижней части внутренней окружности статора находится северный полюс, а в верхней — южный.*

В момент  $t_1$  в фазе А ток положителен, в фазах В и С — отрицателен. Следовательно, в проводниках Z, А и У токи направлены на зрителя, а в проводниках С, Х и В — от зрителя (рис. 5.14, б) и магнитное поле повернуто на  $90^\circ$  по часовой стрелке относительно своего начального направления.

В момент  $t_2$  токи в фазах А и В положительны, а в фазе С ток отрицателен. Следовательно, в проводниках А, Z и В токи направлены на зрителя, а в проводниках У, С и Х — от зрителя и магнитное поле повернуто еще на больший угол относительно начального направления (рис. 5.14, в).

Таким образом, во времени происходит непрерывное и равномерное изменение направления магнитного поля, созданного трехфазной обмоткой, т. е. магнитное поле вращается с постоянной скоростью.

В нашем случае вращение магнитного поля происходит по часовой стрелке.

**Правило.**

*Если изменить чередование фаз трехфазной обмотки, т. е. изменить подключение к сети любых двух из трех обмоток, то изменится и направление вращения магнитного поля.*

На рис. 5.15 показана трехфазная обмотка, у которой изменено подключение обмоток В и С к сети. Если рассмотреть магнитные поля для ранее выбранных моментов времени  $t = 0$ ,  $t = t_1$  и  $t = t_2$ , то видно, что магнитное поле вращается теперь против часовой стрелки.

Магнитный поток, создаваемый трехфазной системой переменного тока в вышеописанной симметричной системе обмоток, является величиной постоянной и в любой момент времени равен полуторному значению максимального потока одной фазы, т. е.  $\Phi = 3/2\Phi_m$ .

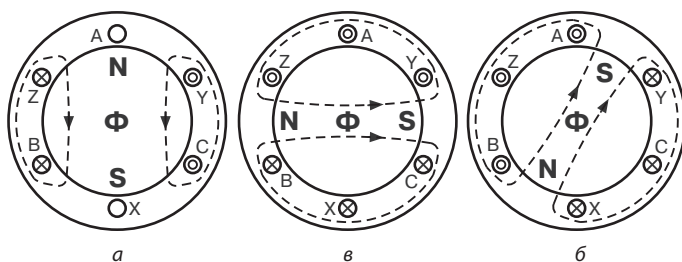


Рис. 5.15. Магнитное поле трехфазной обмотки в различные моменты времени после изменения чередования фаз:  $t = 0$  (а);  $t = t_1$  (б);  $t = t_2$  (в)

Это можно доказать, определив результирующий магнитный поток  $\Phi$  для любого момента времени.

Например, для момента  $t_1$ , когда  $\omega t_1 = 90^\circ$ , токи в катушках имеют такое значение:

$$\begin{aligned} i_A &= I_m \sin 90^\circ = I_m; \\ i_B &= I_m \sin(90 - 120)^\circ = - (I_m/2); \\ i_C &= I_m \sin(90 - 240)^\circ = - (I_m/2). \end{aligned}$$



#### Вывод.

Следовательно, магнитный поток  $\Phi_A$  обмотки А в выбранный момент имеет наибольшее значение и направлен по оси этой обмотки в положительном направлении (рис. 5.16).

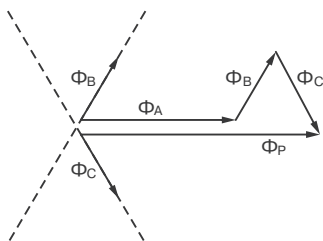


Рис. 5.16. Геометрическая сумма потоков

Магнитные потоки обмоток В и С вдвое меньше максимального и отрицательны, т. е. направлены отрицательно вдоль осей этих обмоток.

Найдем геометрическую сумму потоков  $\Phi_A$ ,  $\Phi_B$  и  $\Phi_C$ .

Например, для момента времени  $t_1$  результирующий магнитный поток  $\Phi_P = \Phi_A + \Phi_B \cos 60^\circ + \Phi_C \cos 60^\circ$ , так как в этот момент результирующий поток совпадает с потоком  $\Phi_A$  и сдвинут относительно потоков  $\Phi_B$  и  $\Phi_C$  на  $60^\circ$ .

Имея в виду, что в момент  $t_1$  магнитные потоки обмоток принимают значения  $\Phi_A = \Phi_m$ ,  $\Phi_B = \Phi_C = (1/2)\Phi_m$  результирующий магнитный поток можно выразить так:

$$\Phi_P = \Phi_m + (1/2)\Phi_m \cos 60^\circ + (1/2)\Phi_m \cos 60^\circ = (3/2)\Phi_m.$$

В момент  $t = 0$  результирующее магнитное поле было направлено по вертикальной оси (рис. 5.15, а).

За время, равное одному периоду изменения тока в катушках, магнитный поток повернется на один полный оборот в пространстве и будет вновь направлен по вертикальной оси также, как и в момент  $t = 0$ .

Если частота тока  $f$ , т. е. ток претерпевает  $f$  изменений в одну секунду, то магнитный поток трехфазной обмотки совершит  $f$  оборотов в секунду или  $60 f$  оборотов в минуту, т. е.  $n = 60f$ , где  $n$  — частота вращения магнитного поля в минуту.

Мы рассмотрели простейший случай, когда обмотка имеет одну пару полюсов.

Если обмотку статора выполнить так: провода каждой фазы будут состоять из 2, 3, 4 и т. д. — одинаковых групп, симметрично расположенных по окружности статора, то число пар полюсов будет, соответственно, 2, 3, 4 и т. д.

На рис. 5.17 показана обмотка одной фазы, состоящая из трех симметрично расположенных по окружности статора катушек, и образующая шесть полюсов, или три пары полюсов.

В многополюсных обмотках магнитное поле за один период изменения тока поворачивается на угол, соответствующий расстоянию между двумя одноименными полюсами.

Таким образом, если обмотка имеет 2, 3, 4 и т. д. пары полюсов, то магнитное поле за один период изменения тока поворачивается на  $1/2$ ,  $1/3$ ,  $1/4$  и т. д. часть окружности статора.

Обозначив буквой  $p$  число пар полюсов, найдем путь, пройденный магнитным полем за один период изменения тока. Этот путь равен  $1/p$  части окружности статора. Следовательно, частота вращения в минуту магнитного поля обратно пропорциональна числу пар полюсов, т. е.

$$n = 60f/p.$$

Итак, частота вращения магнитного поля в минуту постоянна и равна частоте тока, умноженной на 60 и деленной на число пар полюсов.

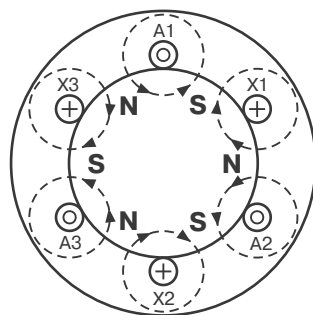


Рис. 5.17. Схема обмотки статора многополюсной машины



## 5.4. Вопросы для тестирования

### Вопрос №1.

В схеме, изображенной на рис. 5.19, три одинаковых лампы А, В и С подключены к генератору синусоидального напряжения. Как изменится яркость свечения ламп при увеличении частоты генератора?

а) Яркость свечения лампы В увеличится; б) яркость свечения лампы А увеличится; в) яркость свечения лампы С уменьшится; г) яркость свечения ламп не изменится.

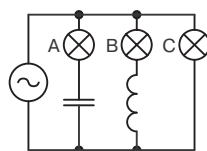


Рис. 5.19.  
Схема цепи для  
вопроса №1

### Вопрос №2.

Симметричная нагрузка соединена треугольником. При измерении фазного тока амперметр показал 10 А. Чему будет равен ток в линейном проводе?

а) 10 А; б) 17,3 А; в) 14,14 А; г) 20 А.

### Вопрос №3.

Почему обрыв нейтрального провода четырехпроводной трехфазной системы является аварийным режимом?

а) На всех фазах приемника энергии напряжение падает; б) на одних фазах приемника энергии напряжение увеличивается, на других уменьшается; в) на всех фазах приемника энергии напряжение возрастает; г) на всех фазах приемника нет напряжения.

### Вопрос №4.

Лампы накаливания с номинальным напряжением 220 В включают в трехфазную сеть с линейным напряжением 220 В. Определить схему соединения ламп.

а) Трехпроводная звезда; б) четырехпроводная звезда; в) треугольник; г) параллельно, между «фазой» и «нулем».

### Вопрос №5.

В трехфазной цепи линейное напряжение равно 220 В, линейный ток 2 А, активная мощность 380 Вт. Найти коэффициент мощности.

а) 0,8; б) 0,6; в) 0,5; г) 0,4.

**Вопрос №6.**

В трехфазную сеть с линейным напряжением 380 В включают трехфазный двигатель, каждая из обмоток которого рассчитана на 220 В. Как следует соединить обмотки двигателя?

а) Треугольником; б) звездой; в) двигатель нельзя включать в эту сеть; г) по-всякому.

**Вопрос №7.**

Линейный ток равен 2,2 А. Рассчитать фазный ток, если симметричная нагрузка соединена звездой?

а) 2,2 А; б) 1,27 А; в) 3,8 А; г) 2,5 А.

**Вопрос №8.**

В симметричной трехфазной цепи линейное напряжение 220 В, линейный ток 5 А, коэффициент мощности 0,8. Определить активную мощность.

а)  $P = 1110 \text{ Вт}$ ; б)  $P = 1140 \text{ Вт}$ ; в)  $P = 1524 \text{ Вт}$ ; г)  $P = 880 \text{ Вт}$ .

**Вопрос №9.**

Симметричный трехфазный потребитель электрической энергии соединен в звезду с нулевым проводом. Как изменятся токи в фазах А, В, С и ток в нулевом проводе  $I_n$ , если в фазе А произойдет обрыв фазного провода? Указать неправильный ответ.

а)  $I_A = 0$ ; б)  $I_B$  — не изменится; в)  $I_C$  — не изменится; г)  $I_n = 0$ .

**Вопрос №10.**

В симметричной трехфазной цепи фазное напряжение равно  $U = 220 \text{ В}$ , фазный ток  $I = 5 \text{ А}$ ,  $\cos \varphi = 0,8$ . Определить реактивную мощность трехфазной цепи.

а) 1,1 кВар; б) 2,64 кВар; в) 1,98 кВар; г) 3 кВар.

## ШЕСТОЙ ШАГ

# ИНТЕРЕСНО, А КАК РАБОТАЮТ ТРАНСФОРМАТОРЫ



*Сделав ШЕСТОЙ шаг, вы познакомитесь с трансформаторами, устройствами, которые снижают или повышают напряжение и ток, развязывают цепи. Вам будет понятен их принцип действия, устройство и работа. Рассмотрите однофазные и трехфазные трансформаторы, автотрансформаторы, измерительные трансформаторы. Произведите опыты холостого хода и короткого замыкания. И в завершении — ответите на вопросы для самотестирования.*

## 6.1. Принцип действия, устройство и работа

### Общие сведения о трансформаторах

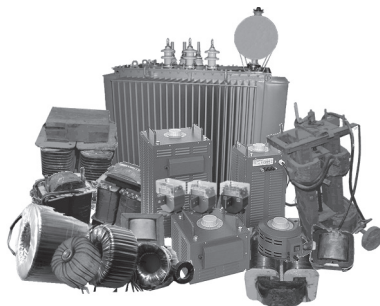


#### Определение.

*Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, преобразующий переменный ток одного напряжения в переменный ток той же частоты, но другого напряжения.*

Трансформаторы получили очень широкое практическое применение при передаче электрической энергии на большие расстояния, для распределения энергии между ее приемниками и в различных выпрямительных, сигнальных, усилительных и других устройствах.

При передаче электрической энергии от электростанций к ее потребителям большое значение имеет величина тока, проходящего по проводам. В зависимости от силы тока выбирают сечение проводов линии передачи энергии и, следо-



Трансформаторы

вательно, определяют стоимость проводов, а также и потери энергии в них.

Если при одной и той же передаваемой мощности увеличить напряжение, то ток в той же мере уменьшится. Это позволит применять провода с меньшим поперечным сечением для устройства линии передачи электрической энергии и уменьшит расход цветных металлов, а также потери мощности в линии.

При неизменной передаваемой мощности поперечное сечение провода и потери мощности в линии обратно пропорциональны напряжению.

Электрическая энергия вырабатывается на электростанциях синхронными генераторами при напряжении 11—18 кВ (в некоторых случаях при 30—35 кВ). Хотя это напряжение очень велико для непосредственного его использования потребителями, однако оно недостаточно для экономичной передачи электроэнергии на большие расстояния. Для увеличения напряжения применяют повышающие трансформаторы.

Приемники электрической энергии (лампы накаливания, электродвигатели и т. д.) из соображений безопасности для лиц, пользующихся этими приемниками, рассчитываются на более низкое напряжение (до 380 В). Кроме того, высокое напряжение требует усиленной изоляции токопроводящих частей, что делает конструкцию аппаратов и приборов очень сложной.

Поэтому высокое напряжение, при котором передается энергия, не может непосредственно использоваться для питания приемников, вследствие чего к потребителям энергия подводится через понижающие трансформаторы.

Таким образом, электрическая энергия при передаче от места ее производства к месту потребления трансформируется несколько раз (3-4 раза). Кроме того, понижающие трансформаторы в распределительных сетях включаются одновременно и не всегда на полную мощность, вследствие чего мощности установленных трансформаторов значительно больше (в 7-8 раз) мощностей генераторов, вырабатывающих электроэнергию на электростанциях.



#### Определение.

*Трансформатор имеет две изолированные обмотки, помещенные на стальном магнитопроводе. Обмотка, включенная в сеть источника электрической энергии, называется **первичной**; обмотка, от которой энергия подается к приемнику, — **вторичной**.*

Обычно напряжения первичной и вторичной обмоток неодинаковы. Если вторичное напряжение больше первичного, то трансформатор называется **повышающим**, если же вторичное напряжение меньше первичного, то **понижающим**.

Любой трансформатор может быть использован и как повышающий, и как понижающий.

### Принцип действия и устройство трансформатора

Действие трансформатора основано на явлении **электромагнитной индукции**. Если первичную обмотку трансформатора включить в сеть источника переменного тока, то по ней будет проходить переменный ток, который возбудит в сердечнике трансформатора переменный магнитный поток. Магнитный поток, пронизывая витки вторичной обмотки трансформатора, индуцирует в этой обмотке ЭДС. Под действием этой ЭДС по вторичной обмотке и через приемник энергии будет протекать ток.

Таким образом, электрическая энергия, трансформируясь, передается из первичной цепи во вторичную, но при другом напряжении, на которое рассчитан приемник энергии, включенный во вторичную цепь.

Для улучшения магнитной связи между первичной и вторичной обмотками их помещают на стальном магнитопроводе.

Для уменьшения потерь от вихревых токов магнитопроводы трансформаторов собирают из тонких пластин (толщиной 0,5 и 0,35 мм) трансформаторной стали, покрытых изоляцией (жаростойким лаком).

Материалом магнитопровода является трансформаторная сталь Э-42, Э-43, Э-43 А, Э-320, Э-330, Э-330А и др.



#### Примечание.

*Холоднокатаная сталь имеет высокую магнитную проницаемость (больше чем горячекатаная) в направлении, совпадающем с направлением проката, тогда как перпендикулярно прокату магнитная проницаемость относительно низкая. Поэтому магнитопроводы из холоднокатаной стали делают так, чтобы магнитные линии замыкались по направлению проката стали.*

Магнитопроводы трансформаторов малой мощности изготавливают из ленты холоднокатаной стали.

В трансформаторах больших мощностей магнитопроводы собирают из полос стали. Холоднокатаную сталь разрезают так, чтобы направление магнитных линий в собранном магнитопроводе совпадало с направлением прокатки стали.

У горячекатаной стали (Э-42, Э-43 и др.) магнитная проницаемость одинакова во всех направлениях и при малых мощностях магнитопроводы собирают из пластин Ш- или П-образной формы, которые штампуются из листовой стали.

В зависимости от формы магнитопровода и расположения обмоток на нем трансформаторы могут быть стержневыми и броневыми. Магнитопровод стержневого однофазного трансформатора имеет два стержня, на которых помещены его обмотки (рис. 6.1, а). Эти стержни соединены ярмом с двух сторон так, что магнитный поток замыкается по стали.

Магнитопровод броневого однофазного трансформатора (рис. 6.1, б) имеет один стержень, на котором полностью помещены обмотки трансформатора. Стержень с двух сторон охватывается (бронируется) ярмом так, что обмотка частично защищена магнитопроводом от механических повреждений.

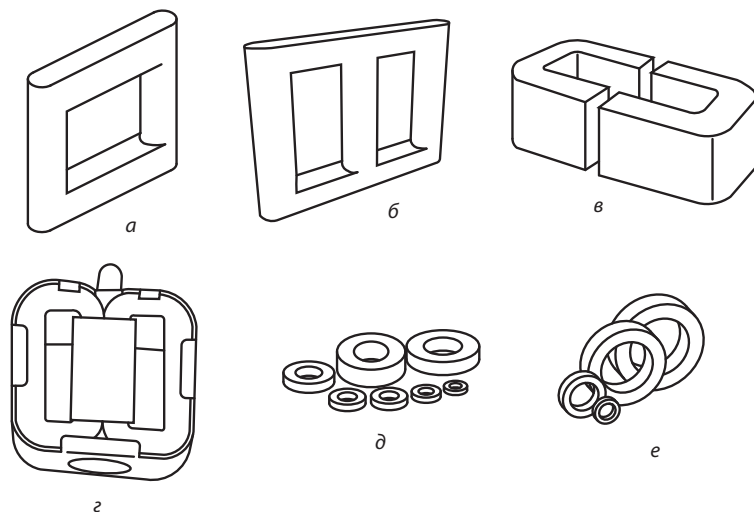


Рис. 6.1. Магнитопроводы однофазных трансформаторов:  
а — пластинчатый стержневой; б — пластинчатый броневой;  
в — ленточный стержневой; г — ленточный броневой;  
д — ленточный кольцевой; е — тороидальный

Ленточные магнитопроводы из холоднокатаной стали подобны стержневым (рис. 6.1, в) или броневым (рис. 6.1, г).



**Примечание.**

*Трансформаторы большой мощности в настоящее время изготавливают исключительно **стержневыми**, а трансформаторы малой мощности часто делают **броневыми**.*

Ближе к стержню магнитопровода располагается обмотка низшего напряжения **НН**, так как ее легче изолировать от магнитопровода, чем обмотку высшего напряжения **ВН**. Обмотку высшего напряжения изолируют от обмотки низшего напряжения прокладками, рейками, шайбами и другими изоляционными деталями (чаще из электрокартона).

При **цилиндрических обмотках** поперечному сечению магнитопровода желательно придать круглую форму, так как в этом случае в площади, охватываемой обмотками, не остается промежутков, не заполненных сталью. Чем меньше незаполненных промежутков, тем меньше длина витков обмоток и, следовательно, масса обмоточного провода при заданной площади поперечного сечения магнитопровода.

Однако магнитопроводы круглого поперечного сечения не делают. Для изготовления магнитопровода круглого сечения надо было бы собрать его из большого числа стальных листов различной ширины.

Поэтому у трансформаторов большой мощности магнитопровод имеет ступенчатое поперечное сечение с числом ступеней не более 10. Число ступеней сечения сердечника определяется числом углов в одной четверти круга.

Для лучшего охлаждения в магнитопроводах и в обмотках мощных трансформаторов устраивают **охлаждающие каналы** в плоскостях, параллельных и перпендикулярных плоскости стальных листов.

В трансформаторах малой мощности поперечное сечение магнитопровода имеет прямоугольную форму и обмоткам придают форму прямоугольных катушек.

При малых токах радиальные механические усилия, возникающие при работе трансформатора и действующие на обмотки, будут малы, так что изготовление обмоток упрощается.

В паспорте трансформатора указывают его номинальную мощность  $S$ , номинальные напряжения  $U_1$  и  $U_2$  и токи  $I_1$  и  $I_2$  первичной и вторичной обмоток при полной (номинальной) нагрузке.

**Определение.**

*Номинальной мощностью трансформаторов называется полная мощность, отдаваемая его вторичной обмоткой при полной (номинальной) нагрузке.*

Номинальная мощность выражается в единицах полной мощности, т. е. в вольт-амперах или киловольт-амперах. В ваттах и киловаттах измеряют активную мощность трансформатора, т. е. ту мощность, которая может быть преобразована из электрической в механическую, тепловую, химическую, световую и т. д.

Сечения проводов обмоток и всех частей машины или любого электрического аппарата определяются не активной составляющей тока или активной мощностью, а полным током, проходящим по проводнику, и, следовательно, полной мощностью.

Трансформаторы малой мощности имеют большую удельную поверхность охлаждения, и естественное воздушное охлаждение является для них вполне достаточным.

Трансформаторы большой мощности устраивают с масляным охлаждением, для чего помещают их в металлические баки, наполненные минеральным маслом. Наиболее широко распространено естественное охлаждение стенок бака трансформатора. Для увеличения охлаждающей поверхности в стенки баков вваривают стальные трубы или радиаторы.

Масло в баке трансформатора в процессе эксплуатации соприкасается с окружающим воздухом и подвергается окислению, увлажнению и загрязнению, вследствие чего уменьшается его электрическая прочность.

Для обеспечения нормальной эксплуатации трансформатора необходимо контролировать температуру масла, заменять его новым, производить периодическую сушку и очистку.

### **Работа трансформатора под нагрузкой**

При холостом ходе трансформатора (нагрузки нет) вторичная обмотка его разомкнута, и ток в этой обмотке не проходит. В первичной обмотке при этом проходит ток холостого хода  $I_0$ , который много меньше тока этой обмотки при номинальной нагрузке трансформатора.

Намагничивающая сила холостого хода  $I_0\omega_1$  возбуждает переменный магнитный поток, который замыкается по магнитопроводу и



индуцирует в первичной и вторичной обмотках ЭДС, зависящие от числа витков этих обмоток  $\omega_1$  и  $\omega_2$ , амплитуды магнитного потока  $\Phi_m$  (В6) и частоты его изменения  $f$ .

Действующие значения ЭДС первичной  $E_1$  и вторичной  $E_2$  обмоток:

$$E_1 = 4,44\omega_1 f\Phi_m;$$

$$E_2 = 4,44\omega_2 f\Phi_m.$$

Так как при холостом ходе во вторичной обмотке тока нет, то напряжение на зажимах этой обмотки равно ЭДС, т. е.  $U_2 = E_2$ .

В первичной обмотке проходит небольшой ток холостого хода, и напряжение этой обмотки незначительно отличается от ЭДС, т. е.  $U_1 \approx E_1$ .



### Определение.

Отношение напряжений на зажимах первичной и вторичной обмоток трансформатора при холостом ходе (без нагрузки) называется **коэффициентом трансформации** и обозначается буквой  $n$ .

Т. е.  $n = U_1/U_2 = E_1/E_2 = \omega_1/\omega_2$  и  $U_1 = (\omega_1/\omega_2)U_2 = nU_2$ .



### Вывод.

Если в трансформаторе первичная и вторичная обмотки имеют различное число витков, то при включении первичной обмотки в сеть переменного тока с напряжением  $U_1$  на зажимах вторичной обмотки возникает напряжение  $U_2$ , не равное напряжению  $U_1$ .

Если вторичную обмотку трансформатора замкнуть на какой-либо приемник энергии (рис. 6.2), то во вторичной цепи будет проходить ток  $I_2$ , а в первичной обмотке — ток  $I_1$ . Магнитодвижущие силы первичной и вторичной совместно возбуждают в магнитопроводе результирующий магнитный поток.

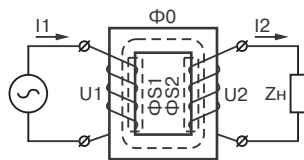


Рис. 6.2. Схема работы трансформатора

Пренебрегая падением напряжения в сопротивлении первичной обмотки трансформатора и потоком рассеяния, можно допустить при любой его нагрузке приближенное равенство абсолютных величин приложенного напряжения и уравнивающей это напряжение ЭДС первичной обмотки, т. е.  $U_1 = E_1$ .

Поэтому при неизменном по величине приложенном напряжении  $U_1$  будет приблизительно неизменной ЭДС  $E_1$ , индуцированная в первичной обмотке при любой нагрузке трансформатора.

Так как ЭДС  $E_1$  зависит от магнитного потока, то и магнитный поток в магнитопроводе трансформатора при любом изменении нагрузки будет приблизительно неизменным и равным магнитному потоку при холостом ходе  $\Phi_m$ .

Следовательно, геометрическая сумма МДС первичной и вторичной обмоток трансформатора при нагрузке равна МДС холостого хода, т. е.

$$i_1 \omega_1 + i_2 \omega_2 = i_0 \omega_1.$$

Из этого следует, что  $i_1 \omega_1 = i_0 \omega_1 - i_2 \omega_2$  или  $i_1 = i_0 - i'_2$ , где  $I'_2 = I_2(\omega_2/\omega_1) = I_2(1/n)$  — приведенный к первичной цепи ток вторичной обмотки.

Таким образом, при нагрузке трансформатора ток первичной обмотки возбуждает магнитный поток в магнитопроводе с неизменной амплитудой (составляющая  $I_0$ ) и уравнивает размагничивающее действие тока вторичной обмотки (составляющая  $I'_2$ ).

Ток  $I_2$ , проходящий по вторичной обмотке при нагрузке трансформатора, создает свой магнитный поток, который согласно **закону Ленца** направлен встречно магнитному потоку в сердечнике и стремится его уменьшить; это бы вызвало уменьшение ЭДС  $E_1$  и увеличение тока  $I_1$ .

Чтобы результирующий магнитный поток в сердечнике остался неизменным, встречный магнитный поток вторичной обмотки должен быть уравновешен магнитным потоком первичной обмотки.



#### Вывод.

*Следовательно, при увеличении тока вторичной обмотки  $I_2$  возрастает размагничивающий магнитный поток этой обмотки. Одновременно увеличиваются как ток первичной обмотки  $I_1$ , так и магнитный поток, создаваемый этим током.*

Так как магнитный поток первичной обмотки уравнивает размагничивающий поток вторичной обмотки, то результирующий магнитный поток в сердечнике оказывается неизменным.

В **понижающем трансформаторе** напряжение первичной обмотки  $U_1$  больше напряжения вторичной обмотки  $U_2$  в  $n$  раз, а ток вторичной обмотки  $I_2$  больше тока первичной обмотки  $I_1$  также в  $n$  раз.

В повышающем трансформаторе имеет место обратное соотношение между напряжениями его обмоток и между токами в них.

Если, например, включить на полную нагрузку трансформатор, напряжения первичной и вторичной обмоток которого равны  $U_1 = 220 \text{ В}$ ,  $U_2 = 24 \text{ В}$ , то при номинальном токе первичной обмотки  $I_1 = 3 \text{ А}$ , ток во вторичной обмотке

$$I_2 = 3 \times (220/24) = 27,5 \text{ А}.$$

Таким образом, в обмотке с более высоким напряжением ток меньше, чем в обмотке с более низким напряжением. Обмотка с более высоким напряжением имеет большее число витков и наматывается из провода с меньшим поперечным сечением, чем обмотка с более низким напряжением.

При работе трансформатора под нагрузкой в его первичной и вторичной обмотках проходят токи, создающие потоки рассеяния  $\Phi_{s1}$  и  $\Phi_{s2}$ .

Эти магнитные потоки сцеплены только с витками той обмотки, током которой они создаются, и всегда много меньше основного магнитного потока  $\Phi_m$ , замыкающегося по магнитопроводу трансформатора (по стали), так как потоки рассеяния частично проходят в немагнитной среде.

**Потоки рассеяния** индуктируют в обмотках ЭДС рассеяния, которые в небольшой степени изменяют напряжение вторичной обмотки трансформатора при изменении его нагрузки.

Условное обозначение работы трансформатора показано на **рис. 6.3**.

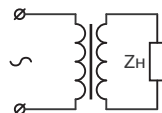
Чтобы не устанавливать отдельный трансформатор на каждое рабочее напряжение, целесообразно на одном трансформаторе иметь **несколько вторичных обмоток с различным числом витков**.

Такие трансформаторы, называемые **многообмоточными**, широко применяют в радиоприемниках, телевизорах, усилителях и другой аппаратуре, требующей для питания несколько переменных напряжений различной величины.

Соотношения числа витков обмоток определяются их напряжениями, т. е.

$$\omega_2/\omega_1 = U_2/U_1; \omega_3/\omega_1 = U_3/U_1.$$

Ток в первичной обмотке равен суммарному току всех приведенных вторичных обмоток:



**Рис. 6.3.** Условное обозначение работы трансформатора

$$I_1 = I_2 U_2 / U_1 + I_3 U_3 / U_1 + \dots$$

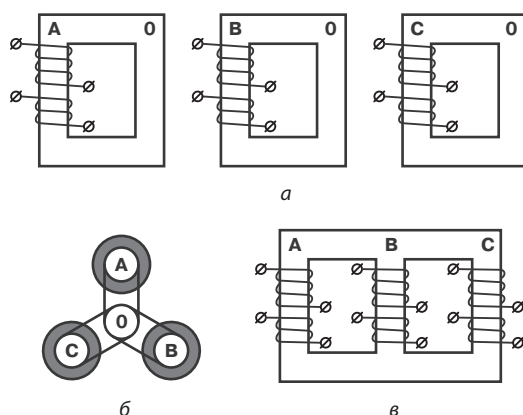
Изменение тока в любой вторичной обмотке вызывает соответствующее изменение тока первичной обмотки. При этом несколько изменяются напряжения всех вторичных обмоток трансформатора, т. е. напряжение любой вторичной обмотки зависит от тока как в этой обмотке, так и в любой другой вторичной обмотке трансформатора.

## 6.2. Трехфазные трансформаторы. Опыты Х.Х. и К.З.

### Трехфазные трансформаторы

Трехфазные трансформаторы изготовляют главным образом **стержневыми**. Схема построения магнитопровода трехфазного стержневого трансформатора показана на (рис. 6.4, а). Три одинаковых однофазных трансформатора выполнены так, что их первичные и вторичные обмотки размещены на одном стержне сердечника, а другой стержень магнитопровода каждого трансформатора не имеет обмотки.

Если эти три трансформатора расположились так, чтобы стержни, не имеющие обмоток, находились рядом, то эти три стержня можно объединить в один 0 (рис. 6.4, б).



**Рис. 6.4.** Схема построения трехфазного трансформатора:

а — три однофазных трансформатора;

б — три однофазных трансформатора объединены в один магнитопровод;

в — схема трехфазного стержневого трансформатора

Через объединенный стержень **0** будут замыкаться магнитные потоки трех однофазных трансформаторов, которые равны по величине и сдвинуты по фазе на  $1/3$  периода.

Так как сумма трех равных по амплитуде и сдвинутых по фазе на  $1/3$  периода магнитных потоков равна нулю в любой момент времени ( $\Phi_a + \Phi_b + \Phi_c = 0$ ), то в объединенном стержне магнитного потока нет, и надобность в этом стержне отпадает.

Таким образом, для образования магнитопровода достаточно иметь три стержня, которые по конструктивным соображениям располагаются в одной плоскости (**рис. 6.4, в**).

На каждом стержне трехфазного трансформатора размещаются обмотки высшего и низшего напряжения одной фазы. Стержни соединяются между собой ярмом сверху и снизу.

Конструктивно обмотки трехфазных трансформаторов выполняются так же, как и однофазных. Начала фаз обмоток высшего напряжения обозначаются прописными буквами **A, B и C**, а концы фаз — **X, Y и Z**.

Если обмотка высшего напряжения имеет выведенную нулевую точку, то этот зажим обозначается буквой **O**.

Начала фаз обмоток низшего напряжения обозначаются строчными буквами **a, b, c**, а концы фаз — **x, y, z**; **o** — вывод нулевой точки.



**Примечание.**

*Обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены звездой и треугольником.*

При соединении обмоток звездой концы (или начала) трех фаз соединяются между собой, образуя нейтральную, или нулевую точку, а свободные зажимы начал (или концов) трех фаз подключаются к трем проводам сети источника (или приемника) электрической энергии переменного тока.

При соединении обмоток треугольником начало первой фазы соединяется с концом второй, начало второй фазы — с концом третьей, начало третьей фазы — с концом первой. Точки соединения начала одной фазы с концом другой подключаются к проводам трехфазной сети переменного тока.

Соединение обмоток трехфазных трансформаторов обозначается:

- ♦ звездой **Y**;
- ♦ треугольником — **Δ**.

Группы трехфазных трансформаторов обозначаются знаками следующего вида  $Y/Y-0$ ,  $Y/\Delta-11$  и т. д., где:

- ♦ знак перед косой линией показывает схему соединения обмоток высшего напряжения;
- ♦ знак после косой линии — схему соединения обмоток низшего напряжения, цифра — угол между векторами линейных напряжений обмоток высшего и низшего напряжения, выраженный числом угловых единиц по  $30^\circ$ .

Так, первое обозначение группы показывает, что обмотки высшего и низшего напряжения соединены звездой, причем обмотки низшего напряжения имеют выведенную нулевую точку, и угол между векторами линейных ЭДС обмоток высшего и низшего напряжения равен  $0 \times 30^\circ$ , т. е.  $0^\circ$ .

Группы трехфазных трансформаторов зависят от схем соединения обмоток, обозначения зажимов фаз обмоток высшего и низшего напряжения и направления намоток.

Если направление намоток витков обмоток высшего и низшего напряжения одинаково, то ЭДС, индуцируемые в фазах обмоток высшего и низшего напряжения, совпадают по фазе; если же обмотки имеют встречное направление намотки, то ЭДС фаз высшего и низшего напряжения находятся в противофазе.

В стандартных схемах обмотки высшего напряжения соединены звездой, так как при такой схеме фазное напряжение в  $\sqrt{3}$  раз меньше линейного, тем самым упрощается изоляция обмоток.

Обмотки низшего напряжения чаще соединяются треугольником, так как при таком соединении трансформатор менее чувствителен к несимметрии нагрузки фаз.

Обмотки низшего напряжения соединяются также по схеме звезда с нулем, так как при такой схеме можно в четырехпроводной сети получить два различных напряжения — линейное и фазное (например, 127 и 220 В, 220 и 380 В и т. д.).

Для увеличения мощности трансформаторной подстанции и для упрощения резерва используется параллельное включение трансформаторов, одним из неперенных условий которого является принадлежность их к одинаковым группам.

### Опыты холостого хода и короткого замыкания

Для испытания трансформатора служат опыты холостого хода и короткого замыкания.

При опыте холостого хода трансформатора (рис. 6.5, а) его вторичная обмотка разомкнута, и тока в этой обмотке нет ( $I_2 = 0$ ).

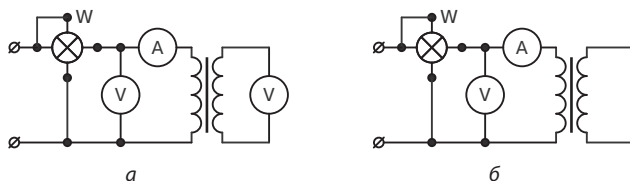


Рис. 6.5. Схема опыта холостого хода (а) и схема опыта короткого замыкания (б) трансформатора.

Если первичную обмотку трансформатора включить в сеть источника электрической энергии переменного тока, то в этой обмотке будет проходить ток холостого хода  $I_0$ . В трансформаторах больших мощностей ток холостого хода может достигать значений порядка 5—10% номинального тока. В трансформаторах малых мощностей этот ток достигает значения 25—30% номинального тока.

Ток холостого хода  $I_0$  создает магнитный поток в магнитопроводе трансформатора. Для возбуждения магнитного потока трансформатор потребляет реактивную мощность из сети. Что же касается активной мощности, потребляемой трансформатором при холостом ходе, то она расходуется на покрытие потерь мощности в магнитопроводе, обусловленных гистерезисом и вихревыми токами.



#### Примечание.

Так как реактивная мощность при холостом ходе трансформатора значительно больше активной мощности, то коэффициент мощности  $\cos\varphi$  его весьма мал и равен 0,2—0,3.

По данным опыта холостого хода трансформатора определяется ток холостого хода  $I_0$ , потери в стали сердечника  $P_{ст}$  и коэффициент трансформации  $n$ . Ток холостого хода  $I_0$  измеряет амперметр, включенный в цепь первичной обмотки трансформатора.

При испытании трехфазного трансформатора определяется фазный ток холостого хода. О потерях в стали сердечника  $P_{ст}$  судят по показаниям ваттметра, включенного в цепь первичной обмотки трансформатора.

**Примечание.**

*Коэффициент трансформации трансформатора равен отношению показаний вольтметров, включенных в цепь первичной и вторичной обмоток.*

При коротком замыкании вторичной обмотки сопротивление трансформатора очень мало и ток короткого замыкания во много раз больше номинального. Такой большой ток вызывает сильный нагрев обмоток трансформатора и приводит к выходу его из строя. Поэтому трансформаторы снабжаются защитой, отключающей его при коротких замыканиях.

При опыте короткого замыкания (рис. 6.5, б) вторичная обмотка трансформатора замкнута накоротко, т. е. напряжение на зажимах вторичной обмотки равно нулю. Первичная обмотка включается в сеть с таким пониженным напряжением, при котором токи в обмотках равны номинальным. Такое пониженное напряжение называется напряжением короткого замыкания и выражается в процентах от номинального значения  $u_k$  %.

По данным опыта короткого замыкания определяется напряжение короткого замыкания  $u_k$  %, его активная  $u_a$  % и реактивная  $u_x$  % составляющие, потери на нагревание обмоток трансформатора  $P_{обм}$  при номинальной нагрузке и активное, реактивное и полное сопротивления трансформатора при коротком замыкании  $R_k$ ,  $X_k$  и  $Z_k$ . Потери в обмотках измеряются ваттметром.

Активное, реактивное и полное сопротивления короткого замыкания трансформатора определяются следующими выражениями:

$$Z_k = \frac{U_k}{I}; \quad R_k = \frac{P_k}{I^2}; \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}.$$

где  $U_k$ ,  $I$  и  $P_k$  — напряжение, ток и мощность, указываемые измерительными приборами, включенными в цепь первичной обмотки трансформатора.

При испытании трехфазного трансформатора следует в приведенных выше выражениях подставить фазные значения напряжения, тока и мощности.

Напряжение короткого замыкания и его активная и реактивная составляющие равны:

$$u_a = (I_H R_k / U_H) \times 100\%; \quad u_p = (I_H X_k / U_H) \times 100\%; \quad u_k = (I_H Z_k / U_H) \times 100\%,$$

где  $U_H$  и  $I_H$  — номинальные напряжение и ток первичной обмотки трансформатора.



### Определение рабочих свойств трансформаторов по данным опытов х.х. и к.з.

Свойства трансформатора при работе его под нагрузкой могут быть определены непосредственным его испытанием. Если включить трансформатор на какую-либо нагрузку и изменять ее, то по показаниям приборов можно определить, каким образом будет изменяться напряжение на зажимах вторичной обмотки и КПД трансформатора.

Однако при испытании трансформатора под нагрузкой происходит очень большой расход электроэнергии (тем больший, чем больше мощность трансформатора), и для создания активной, индуктивной и емкостной нагрузок необходимо громоздкое оборудование (реостаты, индуктивные катушки и конденсаторы).

Кроме этого, непосредственное испытание трансформатора дает очень неточные результаты.

Рабочие свойства трансформатора могут быть определены по данным опытов холостого хода и короткого замыкания. При этом требуется сравнительно малая затрата энергии, отпадает надобность в громоздком оборудовании, кроме того значительно повышается точность измерений, чем при непосредственном испытании.

По данным опыта холостого хода измеряют напряжения на первичной и вторичной обмотках  $U_1$  и  $U_2$ , ток холостого хода  $I_0$  и потребляемую при холостом ходе мощность  $P_0$ , которая расходуется на покрытие потерь в стали магнитопровода, т. е.  $P_{ст} = P_0$ .

По данным опыта короткого замыкания, измеряют напряжение короткого замыкания  $U_k$ , ток первичной обмотки, равный номинальному  $I_N$ , и мощность  $P_k$ , потребляемую трансформатором при опыте короткого замыкания и расходуемую на покрытие потерь в обмотках при номинальной нагрузке, т. е.  $P_{обм} = P_k$ , сопротивления (полное, активное и реактивное) трансформатора при коротком замыкании  $Z_k$ ,  $R_k$  и  $X_k$ , а также относительные значения напряжения короткого замыкания  $u_k$ , его активной  $u_a$  и реактивной  $u_p$  составляющих.



#### Примечание.

*При испытании трехфазного трансформатора все величины определяются для одной фазы.*

По данным опытов холостого хода и короткого замыкания можно найти напряжение на зажимах вторичной обмотки и КПД трансформатора при любой нагрузке.

Процентное понижение вторичного напряжения при любой нагрузке равно:

$$\Delta u \% = ((U_{20} - U_2)/U_{20}) \times 100 = \beta (u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2),$$

где  $\beta = I/I_N$  — коэффициент нагрузки;  $I$  — ток при выбранной нагрузке;

$\varphi_2$  — фазный сдвиг между напряжением и током вторичной обмотки.

Напряжение вторичной обмотки при нагрузке  $U_2 = U_{20}(1 - \Delta u/100)$ , где  $U_{20}$  — напряжение при холостом ходе.



#### Вывод.

*Таким образом, напряжение вторичной обмотки зависит не только от величины, но и от характера нагрузки.*

При индуктивном характере нагрузки напряжение понижается с ростом нагрузки в большей степени, чем при чисто активной. При емкостном характере нагрузки происходит повышение напряжения с ростом нагрузки.

Задаваясь значениями  $\beta$  и  $\varphi_2$ , можно определить  $\Delta u$  и  $U_2$  при любой нагрузке трансформатора, не подвергая его испытанию под нагрузкой.



#### Определение.

*Коэффициентом полезного действия (КПД) или отдачей трансформатора называется отношение полезной мощности трансформатора  $P_2$  к мощности, потребляемой им из сети источника электрической энергии  $P_1$ , т. е.  $\eta = P_2/P_1$ .*

Потребляемая мощность  $P_1$  будет всегда больше полезной мощности  $P_2$ , так как при работе трансформатора происходит потеря преобразуемой им энергии. Потери в трансформаторе складываются из потерь в стали магнитопровода  $P_{ст}$  и потерь в обмотках  $P_{обм}$ .

Таким образом, потребляемую трансформатором мощность можно определить следующим выражением:

$$P_1 = P_2 + P_{ст} + P_{обм}.$$

Полезную мощность трансформатора находят следующим образом:

- ♦ для однофазного

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2,$$

- ♦ для трехфазного

$$P_2 = \sqrt{3}U_2 I_2 \cos \varphi_2.$$

Следовательно, КПД можно определить для однофазного и трехфазного трансформатора для любой нагрузки  $P_2$  следующими выражениями:

$$\eta = (U_2 I_2 \cos \varphi_2) / (U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{\text{ст}} + P_{\text{обм}});$$

$$\eta = \frac{\sqrt{3}U_2 I_2 \cos \varphi_2}{\sqrt{3}U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{\text{ст}} + P_{\text{обм}}}.$$



**Примечание.**

*Наибольший КПД трансформатора будет при нагрузке, для которой потери в стали равны потерям в обмотках. У современных трансформаторов КПД очень высок и достигает при полной нагрузке 95—99,5%.*

Задаются полезной мощностью  $P_2$ , например, 0, 25, 50, 75, 100, 125% номинальной мощности, и для каждой из выбранных мощностей определяют потери в трансформаторе.

Потери в стали магнитопровода  $P_{\text{ст}}$  зависят от марки стали, из которой выполнен сердечник, от частоты тока сети и магнитной индукции в сердечнике.

Так как частота тока сети и магнитная индукция остаются неизменными при работе трансформатора, то и потери в стали не зависят от нагрузки и остаются постоянными.

Потери в обмотках расходуются на нагревание проводников этих обмоток проходящими по ним токами и пропорциональны току во второй степени. Таким образом, при нагрузке 0,5 от номинальной токи в обмотках будут вдвое, а потери в обмотках в четыре раза меньшими, чем при номинальной нагрузке. Задаваясь значениями  $\cos \varphi_2$ , определяют КПД при любой нагрузке трансформатора.

### Опыт холостого хода однофазного трансформатора

По результатам измерений, проведенных в опыте холостого хода трансформатора (рис. 6.6), определить:

- а) коэффициент трансформации трансформатора

$$n = U_{1\text{ном}} / U_{2\text{ном}};$$

б) амплитудные значения магнитного потока и магнитной индукции в сердечнике трансформатора

$$\Phi_m = U_{\text{ном}} / 4,44 f_1 w_1;$$

$$B_m = \Phi_m / S,$$

где  $w_1$  — число витков первичной обмотки трансформатора;  $S$  — площадь поперечного сечения сердечника трансформатора (вычислить по данным замеров);

$$n = 220 / 22,8 = 9,6;$$

$$Z_m = U_1 / I_0 = 220 / 0,026 = 8461 \text{ Ом}$$

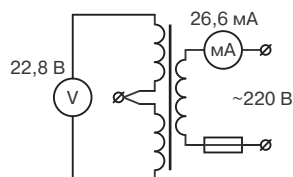


Рис. 6.6. Схема холостого хода однофазного трансформатора

### Опыт короткого замыкания однофазного трансформатора

По результатам измерений опыта короткого замыкания определить электрические потери мощности в трансформаторе  $P_{\text{э ном}}$   $P_{\text{к}}$ .

Результаты измерений

Таблица 6.1

Измерения			
№	$U_1$ , В	$I_1$ , мА	$I_2$ , мА
1	0	0	0
2	17	66,2	400
3	19	90,8	500
4	28	112	700
5	32	140	1000

Можно считать, что при опыте короткого замыкания вся мощность  $P_{\text{к}}$ , потребляемая трансформатором, идет на нагрев обмоток трансформатора, т. е. равна электрическим потерям  $P_{\text{э}}$  в проводах обмоток при номинальной нагрузке:

$$P_{\text{к}} = P_{\text{э}} + P_{\text{м}} = I;$$

$$I_{\text{ном}} R_{\text{к}} = 140 \times 140 \times R_{\text{к}} = 19600 \text{ Вт} \times R_{\text{к}};$$

$$Z_{\text{к}} = U_1 / I_0 = 32 / 0,14 = 228 \text{ Ом}.$$

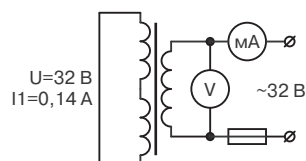
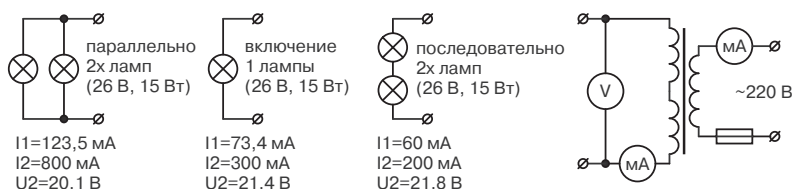


Рис. 6.7. Схема опыта короткого замыкания однофазного трансформатора

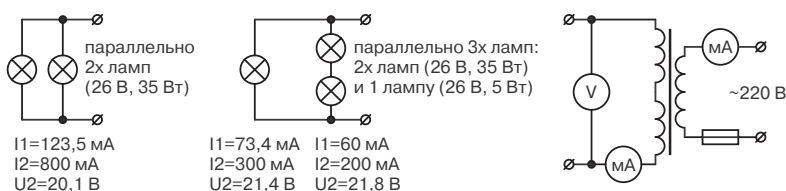
## Опыт нагрузки однофазного трансформатора

Полный расчет трансформатора возможен только при наличии ваттметра.



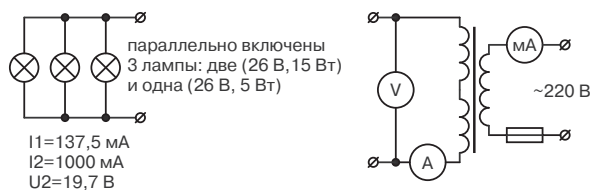
**Рис. 6.8.** Схемы опыта с малыми нагрузками:

- 1 — последовательно 2х ламп (26 В, 15 Вт); 2 — включение 1 лампы (26 В, 15 Вт);  
 3 — параллельно 2х ламп (26 В, 15 Вт);



**Рис. 6.9.** Схемы опыта с большими нагрузками:

- 1 + 2 — параллельно 3х ламп: 2х ламп (26 В, 35 Вт) + 1 лампу (26 В, 5 Вт);  
 3 — параллельно 2х ламп (26 В, 35 Вт)



**Рис. 6.10.** Схема опыта с номинальной нагрузкой:  
 параллельно включены 3 лампы: две (26 В, 15 Вт) и одна (26 В, 5 Вт)

## 6.3. Автотрансформаторы и измерительные трансформаторы

### Автотрансформаторы

В конструктивном отношении автотрансформатор подобен трансформатору. На стальном магнитопроводе помещены две обмотки, выполненные из проводников различного поперечного сечения. Конец одной обмотки электрически соединяется с началом другой

так, что две последовательно соединенные обмотки образуют общую обмотку высшего напряжения.

Обмоткой низшего напряжения, являющейся частью обмотки высшего напряжения, служит одна из двух обмоток автотрансформатора. Таким образом, между обмотками высшего и низшего напряжений автотрансформатора имеется не только магнитная, но и электрическая связь.

Первичное напряжение подведено к зажимам А-х первичной обмотки с числом витков  $\omega_1$ . Вторичной обмоткой является часть первичной а-х с числом витков  $\omega_2$ .

При холостом ходе  $I_2 = 0$ , пренебрегая падением напряжения в активных сопротивлениях обмоток, можно записать уравнения равновесия ЭДС для первичной и вторичной обмоток:

$$\begin{aligned} U_1 &= E_1 = 4,44\omega_1 f\Phi_m; \\ U_2 &= E_2 = 4,44\omega_2 f\Phi_m. \end{aligned}$$

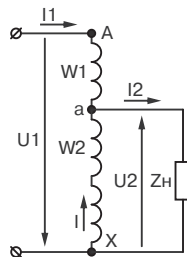


Рис. 6.11. Схема понижающего трансформатора



#### Определение.

Отношение напряжения первичной и вторичной обмоток при холостом ходе называется **коэффициентом трансформации автотрансформатора**, т. е.

$$U_1/U_2 = \omega_1/\omega_2 = n.$$

Если вторичную обмотку автотрансформатора замкнуть на какой-либо приемник энергии, то во вторичной цепи будет проходить ток  $I_2$ . Пренебрегая потерями энергии, мощность, потребляемую автотрансформатором из сети, можно принять равной мощности, отдаваемой во вторичную сеть, т. е.

$$P = U_1 I_1 = U_2 I_2.$$

Откуда  $I_1/I_2 = \omega_2/\omega_1 = 1/n$ .



#### Вывод.

Таким образом, основные соотношения трансформатора остаются без изменения в автотрансформаторах.

В общей части обмотки **а-х**, принадлежащей сети высшего и низшего напряжения, проходят токи  $I_1$  и  $I_2$ , направленные встречно.

Если пренебречь током холостого хода, величина которого очень мала то можно считать, что токи  $I_1$  и  $I_2$  сдвинуты по фазе на  $180^\circ$  и ток  $I_{12}$  в части обмотки **а-х** равен арифметической разности токов вторичной и первичной цепей, т. е.

$$I_{12} = I_2 - I_1 = I_2 (1 - 1/n).$$

В понижающем автотрансформаторе ток  $I_{12}$  совпадает по направлению с током  $I_2$ , в повышающем — направлен противоположно току  $I_2$ .



**Примечание.**

*Преимуществом автотрансформатора перед трансформатором той же полезной мощности является меньший расход активных материалов — обмоточного провода и стали, меньшие потери энергии, более высокий КПД, меньшее изменение напряжения при изменении нагрузки.*

Масса провода обмоток автотрансформатора меньше массы провода обмоток трансформатора при одинаковых плотностях тока. Это объясняется тем, что у трансформатора на магнитопроводе имеются две обмотки:

- ♦ **первичная** с числом витков  $\omega_1$ , поперечное сечение провода которой рассчитано на ток  $I_1$ ;
- ♦ **вторичная** с числом витков  $\omega_2$ , поперечное сечение провода которой рассчитано на ток  $I_2$ .

У автотрансформатора также две обмотки, но одна из них (часть **А-а**) имеет число витков  $(\omega_1 - \omega_2)$  из провода, поперечное сечение которого рассчитано на ток  $I_1$ , а другая (часть **а-х**) с числом витков  $\omega_2$  из провода, поперечное сечение которого рассчитано на разность токов  $I_2 - I_1 = I_{12}$ .

Поперечное сечение и масса стали магнитопровода автотрансформатора также меньше сечения и массы стали магнитопровода трансформатора. Это объясняется тем, что в трансформаторе энергия из первичной сети во вторичную передается магнитным путем в результате электромагнитной связи между обмотками.

В автотрансформаторе энергия из первичной сети во вторичную частично передается путем электрического соединения первичной и вторичной сети, т. е. электрическим путем. Так как в процессе пере-

дачи этой энергии магнитный поток не участвует, у автотрансформатора электромагнитная мощность меньше, чем у трансформатора.

Полезная мощность автотрансформатора при активной нагрузке равна:

$$P_2 = U_2 I_2.$$

Имея в виду, что  $I_2 = I_1 + I_{12}$ , получим:

$$P_2 = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = P_3 + P_m,$$

где  $P_3$  — мощность, электрически поступающая во вторичную обмотку;

$P_m$  — электромагнитная мощность автотрансформатора, определяющая необходимый магнитный поток, поперечное сечение и массу стали магнитопровода.

Эта мощность является расчетной или габаритной мощностью автотрансформатора.

Наряду с преимуществами автотрансформаторов перед трансформаторами они имеют существенные недостатки:

- ♦ малое сопротивление короткого замыкания, что обуславливает большую кратность тока короткого замыкания;
- ♦ возможность попадания высшего напряжения в сеть низшего напряжения из-за электрической связи между этими сетями.



**Внимание.**

*Наличие электрической связи между сетью источника и приемника энергии делает невозможным применять автотрансформатор в том случае, когда приемник энергии имеет заземленный полюс (в выпрямительных устройствах).*

Достоинства автотрансформаторов будут выражены тем сильнее, чем коэффициент трансформации ближе к единице. Поэтому автотрансформаторы применяют при небольших коэффициентах трансформации ( $n = 1—2$ ).

В трехфазных сетях используют трехфазные автотрансформаторы, обмотки которых обычно соединяются звездой.



## Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы делятся на две группы:

- ♦ трансформаторы напряжения;
- ♦ трансформаторы тока.

Их применяют в цепях переменного тока для расширения пределов измерения измерительных приборов и для изоляции этих приборов от токопроводящих частей, находящихся под высоким напряжением.

**Трансформаторы напряжения** конструктивно представляют собой обычные трансформаторы малой мощности. **Первичная обмотка** такого трансформатора включается в два линейных провода сети, напряжение которой измеряется или контролируется. Во **вторичную обмотку** включают вольтметр или параллельную обмотку ваттметра, счетчика или другого измерительного прибора.

Коэффициент трансформации трансформатора напряжения выбирают таким, чтобы при номинальном первичном напряжении напряжение вторичной обмотки было 100 В.

Режим работы трансформатора напряжения подобен режиму холостого хода обычного трансформатора, так как сопротивление вольтметра или параллельной обмотки ваттметра, счетчика и т. п. велико и током во вторичной обмотке можно пренебречь.

Включение во вторичную обмотку большого числа измерительных приборов нежелательно. Если параллельно вольтметру, включенному во вторичную обмотку трансформатора подсоединить еще один вольтметр или параллельную обмотку ваттметра, счетчика и т. п., то ток во вторичной обмотке трансформатора увеличится, что вызовет падение напряжения на зажимах вторичной обмотки, и точность показаний приборов понизится.

**Трансформаторы тока** служат для преобразования переменного тока большой величины в ток малой величины и изготавливаются таким образом, чтобы при номинальном токе первичной цепи во вторичной обмотке ток был 5 А.

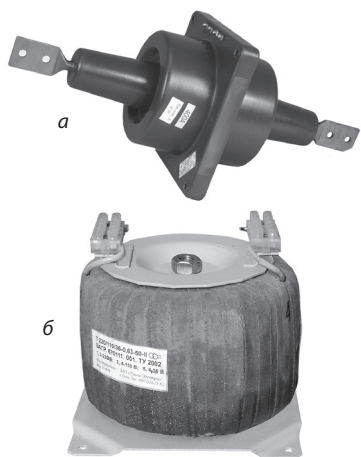


Рис. 6.12. Трансформаторы: тока (а); напряжения (б)

**Первичная обмотка** трансформатора тока включается в разрез линейного провода (последовательно с нагрузкой), ток в котором, измеряется; **вторичная обмотка** замкнута на амперметр или на последовательную обмотку ваттметра, счетчика и т. п., т. е. соединена с измерительным прибором, имеющим малое сопротивление.



**Примечание.**

*Режим работы трансформатора тока существенно отличается от режима работы обычного трансформатора.*

В обычном трансформаторе при изменении нагрузки магнитный поток в сердечнике остается практически неизменным, если постоянно приложено напряжение.

Если в обычном трансформаторе уменьшить нагрузку, т. е. силу тока во вторичной обмотке, то и в первичной обмотке сила тока понизится, и если вторичную обмотку разомкнуть, то сила тока в первичной обмотке уменьшится до тока холостого хода  $I_0$ .

При работе трансформатора тока его вторичная обмотка замкнута на измерительный прибор с малым сопротивлением, и режим работы трансформатора близок к короткому замыканию. Поэтому магнитный поток в магнитопроводе трансформатора мал.

Если разомкнуть вторичную обмотку трансформатора тока, то тока в этой обмотке не будет, а в первичной обмотке ток останется неизменным.

Таким образом, при разомкнутой вторичной обмотке трансформатора тока магнитный поток в магнитопроводе, возбужденный током первичной обмотки и не встречающий размагничивающего действия тока вторичной обмотки, окажется очень большим и, следовательно, ЭДС вторичной обмотки, имеющей большое число витков, достигает величины, опасной для целостности изоляции этой обмотки и для обслуживающего персонала.

Поэтому при выключении измерительных приборов из вторичной обмотки трансформатора тока эту обмотку необходимо замкнуть накоротко.

Включение большого числа измерительных приборов во вторичную обмотку трансформатора тока снижает точность измерения.



**Рис. 6.13.** Схема измерительных трансформаторов: напряжения (а); тока (б)

Конструкции трансформаторов тока в зависимости от назначения чрезвычайно разнообразны и делятся на две группы: стационарные; переносные.

При работе измерительных трансформаторов напряжения и тока возможен пробой изоляции их первичных обмоток и, как следствие пробоя, электрическое соединение первичной обмотки с сердечником или с вторичной обмоткой.



**Внимание.**

*Для безопасности обслуживания сердечники и вторичные обмотки измерительных трансформаторов должны заземляться.*

## 6.4. Вопросы для тестирования

**Вопрос №1.**

При каком напряжении выгоднее передавать электрическую энергию в линиях электропередач при заданной мощности?

*а) При пониженном; б) при среднем; в) безразлично; г) при повышенном.*

**Вопрос №2.**

У силового однофазного трансформатора номинальное напряжение на входе  $U_1 = 6000$  В, на выходе  $U_2 = 100$  В. Определить коэффициент трансформации трансформатора.

*а)  $K = 6$ ; б)  $K = 0,017$ ; в) для решения задачи недостаточно данных; г)  $K = 60$ .*

**Вопрос №3.**

При каких значениях коэффициента трансформации целесообразно применять автотрансформаторы?

*а) При больших,  $k > 2$ ; б) при малых,  $k < 2$ ; в) только при  $k = 2$ ; г) не имеет значения.*

**Вопрос №4.**

Какой физический закон лежит в основе принципа действия трансформатора?

*а) Закон Ома; б) закон Кирхгофа; в) закон электромагнитной индукции; г) закон полного тока.*

**Вопрос №5.**

На какие режимы работы рассчитаны измерительные трансформаторы 1) напряжения, 2) тока?

а) 1) холостой ход, 2) короткое замыкание; б) 1) короткое замыкание, 2) холостой ход; в) оба на режим короткого замыкания, г) оба на режим холостого хода.

**Вопрос №6.**

Определить коэффициент трансформации однофазного трансформатора, если его номинальные параметры составляют:  $U_1 = 220$  В;  $I_1 = 10$  А;  $U_2 = 110$  В;  $I_2 = 20$  А.

а)  $K = 2$ ; б)  $K = 0,5$ ; в)  $K = 10$ ; г) для решения задачи недостаточно данных.

**Вопрос №7.**

Какие трансформаторы позволяют плавно изменять напряжение на выходных зажимах?

а) Силовые трансформаторы; б) измерительные трансформаторы; в) автотрансформаторы; г) сварочные трансформаторы.

**Вопрос №8.**

Какой режим работы трансформатора позволяет определить коэффициент трансформации?

а) Режим холостого хода; б) режим короткого замыкания; в) нагрузочный режим; г) спящий режим.

**Вопрос №9.**

Чем принципиально отличается автотрансформатор от трансформатора?

а) Малым коэффициентом трансформации; б) возможностью изменения коэффициента трансформации; в) электрическим соединением первичной и вторичной цепей; г) типоразмером.

**Вопрос №10.**

При какой нагрузке трансформатор имеет наибольший КПД?

а) При нагрузке, для которой потери в стали больше потерь в обмотках; б) при нагрузке, для которой потери в стали меньше потерь в обмотках; в) при  $K = 1$ ; г) при нагрузке, для которой потери в стали равны потерям в обмотках.

## СЕДЬМОЙ ШАГ

# БУДЕМ ЗНАКОМЫ: АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ



*Сделав СЕДЬМОЙ шаг, вы познакомитесь с асинхронными двигателями, которые отличаются простотой конструкции и обслуживания. Освойте принцип действия и устройство асинхронного двигателя, его работу под нагрузкой, вращающий момент и рабочие характеристики. Рассмотрите пуск в ход, регулирование частоты вращения однофазных и трехфазных асинхронных двигателей. И в завершении — ответите на вопросы для само-тестирования.*

## 7.1. Принцип действия и устройство асинхронного двигателя

### Общие сведения об электрических машинах

Электрические машины широко применяют на электрических станциях, в промышленности, на транспорте, в авиации, в системах автоматического регулирования и управления, в быту.

Электрические машины преобразуют механическую энергию в электрическую, и наоборот.



#### Определение.

*Машина, преобразующая механическую энергию в электрическую, называется **генератором**. Преобразование электрической энергии в механическую осуществляется **двигателями**. Любая электрическая машина может быть использована как в качестве генератора, так и в качестве двигателя.*

Это свойство электрической машины изменять направление преобразуемой ею энергии называется **обратимостью машины**. Электрическая машина может быть также использована для преобразования электрической энергии одного рода тока (частоты, числа фаз переменного тока, напряжения постоянного тока) в энергию другого рода тока. Такие электрические машины называются **преобразователями**.

В зависимости от рода тока электроустановки, в которой должна работать электрическая машина, они делятся на две категории: машины постоянного тока; машины переменного тока.

Машины переменного тока могут быть как **однофазными**, так и **многофазными**.

Наиболее широкое применение нашли трехфазные синхронные и асинхронные машины, а также коллекторные машины переменного тока, которые допускают экономичное регулирование частоты вращения в широких пределах.

### Принцип действия электрических машин

Принцип действия электрических машин основан на использовании законов электромагнитной индукции и электромагнитных сил. Если в магнитном поле полюсов постоянных магнитов или электромагнитов (**рис. 7.1**) поместить проводник и под действием какой-либо силы  $F_1$  перемещать его перпендикулярно магнитным линиям, то в нем возникает ЭДС, равная:

$$E = Blv,$$

где  $B$  — магнитная индукция в месте, где находится проводник;

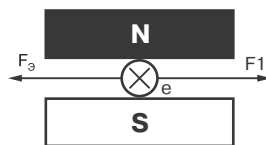
$l$  — активная длина проводника (та часть, которая находится в магнитном поле);

$v$  — скорость перемещения проводника в магнитном поле.

Направление ЭДС (на **рис. 7.1** от зрителя за плоскость чертежа), индуцируемой в проводнике, определяется согласно **правилу правой руки**.

Если этот проводник замкнуть на какой-либо приемник энергии, то в замкнутой цепи под действием ЭДС будет протекать ток, совпадающий по направлению с ЭДС в проводнике.

В результате взаимодействия тока в проводнике с магнитным полем полюсов создается



**Рис. 7.1.** Схема, поясняющая принцип действия электрической машины

электромагнитная сила  $F_z$ , направление которой определяется **по правилу левой руки**. Эта сила будет направлена навстречу силе, перемещающей проводник в магнитном поле.

При равенстве сил  $F_1 = F_z$  проводник будет перемещаться с постоянной скоростью. Следовательно, в такой простейшей электрической машине механическая энергия, затрачиваемая на перемещение проводника, преобразуется в энергию электрическую, отдаваемую сопротивлению внешнего приемника энергии, т. е. машина работает **генератором**.

Та же простейшая электрическая машина может работать **двигателем**. Если от постороннего источника электрической энергии через проводник пропустить ток, то в результате взаимодействия тока в проводнике с магнитным полем полюсов создается электромагнитная сила  $F_z$ , под действием которой проводник начнет перемещаться в магнитном поле, преодолевая силу торможения какого-либо механического приемника энергии.

Таким образом, рассмотренная машина так же, как и любая электрическая машина, обратима, т. е. может работать как генератором, так и двигателем.

Для увеличения ЭДС и электромеханических сил электрические машины имеют обмотки, состоящие из большого числа проводов, которые соединяются между собой так, чтобы ЭДС в них были одинаково направлены и складывались.

ЭДС в проводнике будет индуцирована также и в том случае, когда проводник неподвижен, а перемещается магнитное поле полюсов.

### Принцип действия асинхронного двигателя

Наибольшее распространение среди электрических двигателей получил трехфазный асинхронный двигатель, впервые сконструированный известным русским электриком М. О. Доливо-Добровольским.

Асинхронный двигатель отличается простотой конструкции и несложностью обслуживания. Как и любая машина переменного тока, асинхронный двигатель состоит из двух основных частей: статора и ротора.



#### Определение.

**Статором** называется неподвижная часть машины, **ротором** — ее вращающаяся часть.

Асинхронная машина обладает **свойством обратимости**, т. е. может быть использована как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Из-за ряда **существенных недостатков** асинхронные генераторы практически почти не применяются, тогда как асинхронные двигатели получили очень широкое распространение.

Многофазная обмотка переменного тока создает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого в минуту  $n_1 = 60f_1/p$ .



### Определение.

Если ротор вращается с частотой, равной частоте вращения магнитного поля ( $n_2 = n_1$ ), то такая частота называется **синхронной**. Если, ротор вращается с частотой, не равной частоте вращения магнитного поля ( $n_2 \neq n_1$ ), то такая частота называется **асинхронной**.

В асинхронном двигателе рабочий процесс может протекать только при асинхронной частоте, т. е. при частоте вращения, не равной частоте вращения магнитного поля.

Частота вращения ротора может очень мало отличаться от частоты вращения поля, но при работе двигателя она будет всегда меньше ( $n_2 < n_1$ ).

Работа асинхронного двигателя основана на явлении, названном «диск Араго-Ленца» (рис. 7.2). Это явление заключается в следующем:

если перед полюсами постоянного магнита поместить медный диск, свободно сидящий на оси, и начать вращать магнит вокруг его оси при помощи рукоятки, то медный диск будет вращаться в том же направлении. Это объясняется тем, что при вращении магнита его магнитное поле пронизывает диски и индуцирует в нем вихревые токи.

В результате взаимодействия вихревых токов с магнитным полем магнита возникает сила, приводящая диск во вращение.

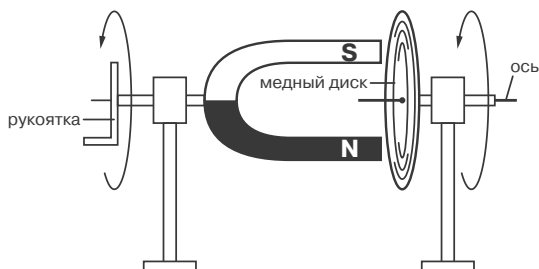


Рис. 7.2. Схема, поясняющая принцип действия асинхронного двигателя



### Закон.

На основании **закона Ленца** направление всякого индуцированного тока таково, что он противодействует причине, его вызвавшей.



Поэтому вихревые токи в теле диска стремятся задержать вращение магнита, но, не имея возможности сделать это, приводят диск во вращение так, что он следует за магнитом. При этом частота вращения диска всегда меньше, чем частота вращения магнита.

Если бы эти частоты почему-либо стали одинаковыми, то магнитное поле не перемещалось бы относительно диска и, следовательно, в нем не возникали бы вихревые токи, т. е. не было бы силы, под действием которой диск вращается.

В асинхронных двигателях постоянный магнит замен вращающимся магнитным полем, создаваемым трехфазной обмоткой статора при включении ее в сеть переменного тока.

Вращающееся магнитное поле статора пересекает обмотки ротора и индуцирует в них ЭДС. Если обмотка ротора замкнута на какое-либо сопротивление или накоротко, то по ней под действием индуцируемой ЭДС проходит ток.

В результате взаимодействия тока в обмотке ротора с вращающимся магнитным полем обмотки статора создастся вращающий момент, под действием которого ротор начинает вращаться по направлению вращения магнитного поля.

Если предположить, что в какой-то момент времени частота вращения ротора оказалась равной частоте вращения поля статора, то проводники обмотки ротора не будут пересекать магнитное поле статора и тока в роторе не будет. В этом случае вращающий момент станет равным нулю, и частота вращения ротора уменьшится по сравнению с частотой вращения поля статора, пока не возникнет вращающий момент, уравновешивающий тормозной момент, который складывается из момента нагрузки на валу и момента сил трения в машине.

Для изменения направления вращения ротора, т. е. для реверсирования двигателя, необходимо изменить направление вращения магнитного поля, созданного обмоткой статора.



**Примечание.**

*Это достигается изменением чередования фаз обмоток статора, для чего следует поменять местами по отношению к зажимам сети любые два из трех проводов, соединяющих обмотку статора с сетью.*

Реверсивные двигатели снабжаются переключателями, при помощи которых можно изменять чередование фаз обмоток статора, а, следовательно, и направление вращения ротора.

Вне зависимости от направления вращения ротора его частота  $n$ , как уже указывалось, всегда меньше частоты вращения магнитного поля статора.

### Устройство асинхронного двигателя

Сердечник статора (рис. 7.3) набирается из стальных пластин толщиной 0,35 или 0,5 мм. Пластины штампуют с впадинами (пазами), изолируют лаком или окалиной для уменьшения потерь на вихревые токи, собирают в отдельные пакеты и крепят в станине двигателя.

К станине прикрепляют также боковые щиты с помещенными на них подшипниками, на которые опирается вал ротора. Станину устанавливают на фундаменте.

В продольные пазы статора укладывают проводники его обмотки, которые соединяют между собой так, что образуется трехфазная система. На щитке машины имеется шесть зажимов, к которым присоединяются начала и концы обмоток каждой фазы.

Для подключения обмоток статора к трехфазной сети они могут быть соединены звездой или треугольником, что дает возможность включать двигатель в сеть с двумя различными линейными напряжениями.

Например, двигатель может работать от сети с напряжением 220 и 127 В. На щитке машины указаны оба напряжения сети, на которые рассчитан двигатель, т. е. 220/127 В или 380/220 В.

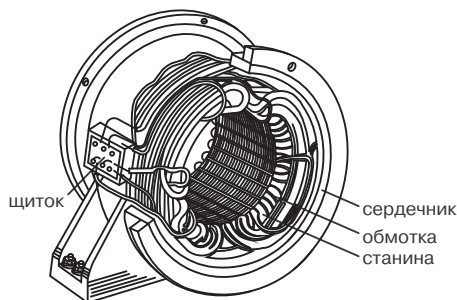


Рис. 7.3. Устройство статора асинхронного двигателя:



#### Примечание.

Для более низких напряжений, указанных на щитке, обмотка статора соединяется **треугольником**, для более высоких — **звездой**.

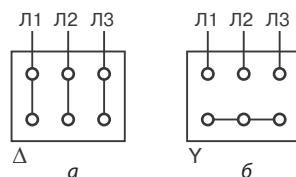


Рис. 7.4. Соединение зажимов на щитке двигателя при включении обмотки статора: треугольником (а); звездой (б)

При соединении обмотки статора треугольником на щитке машины верхние зажимы объединяют перемычками с ниж-

ними (рис. 7.4). Причем каждую пару соединенных вместе зажимов подключают к линейным проводам трехфазной сети.

Для включения звездой три нижних зажима на щитке соединяют перемычками в общую точку, а верхние подключают к линейным проводам трехфазной сети.

Сердечник ротора (рис. 7.5, а) также набирают из стальных пластин толщиной 0,5 мм, изолированных лаком или окалиной для уменьшения потерь на вихревые токи.

Пластины штампуют с впадинами и собирают в пакеты, которые крепят на валу машины. Из пакетов образуется цилиндр с продольными пазами, в которые укладывают проводники обмотки ротора.

В зависимости от типа обмотки асинхронные машины могут быть двух типов:

- ♦ с фазными роторами;
- ♦ с короткозамкнутыми роторами.

Короткозамкнутая обмотка ротора выполняется по типу беличьего колеса (рис. 7.5, б). В пазах ротора укладывают массивные стержни, соединенные на торцовых сторонах медными кольцами (рис. 7.5, а).

Часто короткозамкнутую обмотку ротора изготавливают из алюминия. Алюминий в горячем состоянии заливают в пазы ротора под давлением.



**Примечание.**

*Такая обмотка всегда замкнута накоротко и включение сопротивлений в нее невозможно.*

Фазная обмотка ротора выполнена подобно статорной, т. е. проводники соответствующим образом соединены между собой, образуя трехфазную систему.

Обмотки трех фаз соединены звездой. Начала этих обмоток подключены к трем контактными медным кольцам, укрепленным на валу ротора. Кольца изолированы друг от друга и от вала и вращаются вместе с ротором.

При вращении колец поверхности их скользят по угольным или медным щеткам, неподвижно укрепленным над кольцами. Обмотка ротора может быть замкнута на какое-либо сопротивление или накоротко, при помощи указанных щеток.

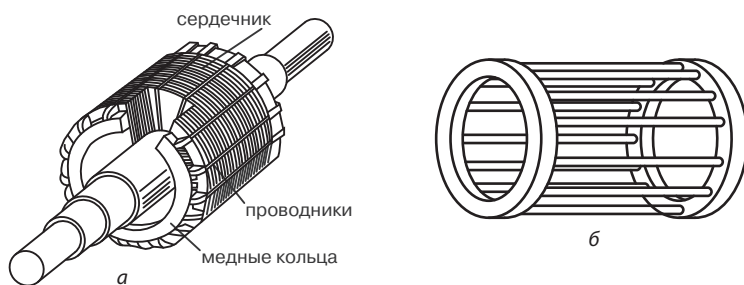


Рис. 7.5. Ротор короткозамкнутого асинхронного двигателя:  
а — устройство; б — обмотка



#### Примечание.

Двигатели с замкнутым ротором проще и надежнее в эксплуатации, значительно дешевле, чем двигатели с фазным ротором. Однако двигатели с фазным ротором, как мы увидим ниже, обладают лучшими пусковыми и регулировочными свойствами.

В настоящее время асинхронные двигатели выполняют преимущественно с короткозамкнутым ротором и лишь при больших мощностях и в специальных случаях используют фазную обмотку ротора.

В России производят асинхронные двигатели мощностью от нескольких десятков ватт до 15000 кВт при напряжениях обмотки статора до 6 кВ.

Между статором и ротором имеется **воздушный зазор**, величина которого оказывает существенное влияние на рабочие свойства двигателя.

Наряду с важными положительными качествами — простотой конструкции и обслуживания, малой стоимостью — асинхронный двигатель имеет и некоторые **недостатки**, из которых наиболее существенным является относительно низкий коэффициент мощности ( $\cos\varphi$ ).

У асинхронного двигателя  $\cos\varphi$  при полной нагрузке может достигать значений 0,85—0,9; при недогрузках двигателя его  $\cos\varphi$  резко уменьшается и при холостом ходе составляет 0,2—0,3.

**Низкий коэффициент мощности асинхронного двигателя** объясняется большим потреблением реактивной мощности, которая необходима для возбуждения магнитного поля. Магнитный поток в асинхронном двигателе встречает на своем пути воздушный зазор между статором и ротором, который в большой степени увеличивает магнитное сопротивление, а, следовательно, и потребляемую двигателем реактивную мощность.

В целях повышения коэффициента мощности асинхронных двигателей воздушный зазор стремятся делать, возможно, меньшим, доводя его у малых двигателей (порядка 2—5 кВт) до 0,3 мм. В двигателях большой мощности воздушный зазор приходится увеличивать по конструктивным соображениям, но все же он не превышает 2—2,5 мм.

## 7.2. Работа под нагрузкой, вращающий момент и рабочие характеристики асинхронного двигателя

### Работа асинхронного двигателя под нагрузкой

В рабочем режиме ротор двигателя вращается с частотой  $n_2$ , меньшей частоты  $n_1$  магнитного поля статора, вращающегося в том же направлении, что и ротор.

Поэтому магнитное поле, имеющее большую частоту, скользит относительно ротора с частотой (об/мин), равной разности частот поля и ротора, т. е.  $n_s = n_1 - n_2$ .

Относительное отставание ротора от вращающегося магнитного поля статора характеризуется скольжением  $S$ .

Скольжение представляет собой отношение разности частот вращения магнитного поля статора и вращающегося ротора к частоте поля статора

$$S = n_s/n_1 = (n_1 - n_2)/n_1.$$

Эта формула определяет скольжение в относительных единицах. Скольжение может быть также выражено в процентах:

$$S = ((n_1 - n_2)/n_1) \times 100\%.$$

Если ротор неподвижен ( $n_2 = 0$ ), то скольжение равно единице или 100%.

Если ротор вращается синхронно с магнитным полем, т. е. с одинаковой частотой ( $n_2 = n_1$ ), то скольжение равно нулю.

Таким образом, чем больше частота вращения ротора, тем меньше скольжение.

В рабочем режиме асинхронного двигателя скольжение мало.

У современных асинхронных двигателей скольжение при полной нагрузке составляет 3—5%, т. е. ротор вращается с частотой, незначительно отличающейся от частоты магнитного поля статора.

При холостом ходе, т. е. при отсутствии нагрузки на валу, скольжение ничтожно мало и может быть принято равным нулю.

Частоту вращения ротора можно определить из следующих соотношений:

$$n_2 = n_1 - n_s = n_1 (1 - S) = (60f_1/p) (1 - S).$$

Двигатель будет работать устойчиво с постоянной частотой вращения ротора при равновесии моментов, т. е. если вращающий двигателя  $M$  будет равен тормозному моменту на валу двигателя  $M_T$ , который развивает приемник механической энергии, например, резец токарного станка. Следовательно, можно записать:  $M = M_T$ .

Любой нагрузке машины соответствует определенная частота вращения ротора  $n_2$  и определенное скольжение  $S$ .

Магнитное поле статора вращается относительно ротора с частотой  $n_s$  и индуцирует в его обмотке ЭДС  $E_2$ , под действием которой по замкнутой обмотке ротора проходит ток  $I_2$ .

Если нагрузка на валу машины увеличилась, т. е. возрос тормозной момент, то равновесие моментов будет нарушено, так как тормозной момент окажется больше вращающего.

Это приведет к уменьшению частоты вращения ротора, а, следовательно, к увеличению скольжения. С увеличением скольжения магнитное поле будет пересекать проводники обмотки ротора чаще, ЭДС  $E_2$ , индуцированная в обмотке ротора, возрастет, а в результате как ток в роторе, так и развиваемый двигателем вращающий момент.

Скольжение и ток в роторе будут увеличиваться до значений, при которых вновь наступит равновесие моментов, т. е. вращающий момент станет равным тормозному.

Также протекает процесс изменения частоты вращения ротора и развиваемого момента при уменьшении нагрузки двигателя.

С уменьшением нагрузки на валу двигателя тормозной момент становится меньше вращающего, что приводит к увеличению частоты вращения ротора или к уменьшению скольжения.

В результате уменьшаются ЭДС и ток в обмотке ротора, а, следовательно, и вращающий момент, который вновь становится равным тормозному моменту.

Магнитное поле статора пересекает проводники обмотки статора и индуцирует в ней ЭДС  $E_1$ , которая уравнивает приложенное напряжение сети  $U_1$ .

Если пренебречь падением напряжения в сопротивлении обмотки статора, которое мало по сравнению с ЭДС, то между абсолютными значениями приложенного напряжения и ЭДС обмотки статора можно допустить приближенное равенство, т. е.

$$U_1 = E_1.$$

Таким образом, при неизменном напряжении сети будет неизменна и ЭДС обмотки статора. Следовательно, магнитный поток в воздушном зазоре машины, также как в трансформаторе, при любом изменении нагрузки остается примерно постоянным.

Ток обмотки ротора создает свое магнитное поле, которое направлено противоположно магнитному полю тока обмотки статора. Чтобы результирующий магнитный поток в машине оставался неизменным при любом изменении нагрузки двигателя, размагничивающее магнитное поле обмотки ротора должно быть уравновешено магнитным полем обмотки статора. Поэтому при увеличении тока в обмотке ротора увеличивается и ток в обмотке статора.



#### **Вывод.**

*Таким образом, асинхронный двигатель подобен трансформатору, у которого при увеличении тока во вторичной обмотке увеличивается ток в первичной обмотке.*

### **Вращающий момент асинхронного двигателя**

Вращающий момент асинхронного двигателя создается при взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с токами в проводниках обмотки ротора. Поэтому вращающий момент зависит как от магнитного потока статора  $\Phi_m$ , так и от тока в обмотке ротора  $I_2$ .

Однако в процессе преобразования энергии (создании вращающего момента) участвует только активная мощность, потребляемая машиной из сети. Вследствие этого вращающий момент зависит не от тока в обмотке ротора  $I_2$ , а только от его активной составляющей, т. е.  $I_2 \times \cos \Psi_2$ , где  $\Psi_2$  — фазный угол между ЭДС и током в обмотке ротора.

Таким образом, вращающий момент асинхронного двигателя определяется следующим выражением:

$$M = C \Phi_m I_2 \cos \Psi_2$$

где  $C$  — конструктивная постоянная машины, зависящая от числа ее полюсов и фаз, числа витков обмотки статора и конструктивного выполнения обмотки.

При условии постоянства приложенного напряжения магнитный поток остается также почти постоянным при любом изменении нагрузки двигателя.

Таким образом, в выражении вращающего момента величины  $\Phi_m$  и  $C$  постоянны и вращающий момент пропорционален только активной составляющей тока в обмотке ротора, т. е.  $M \sim I_2 \cos \Psi_2$ .

Изменение нагрузки или тормозного момента на валу двигателя изменяет частоту вращения ротора и скольжение, что вызовет изменение как тока в роторе  $I_2$ , так и его активной составляющей  $I_2 \cos \Psi_2$ .

Можно ток в роторе определить отношением ЭДС к полному сопротивлению, т. е.

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} \text{ и } \cos \Psi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}},$$

где  $Z_2$ ,  $R_2$  и  $X_2$  — полное, активное и реактивное сопротивления фазы обмотки ротора.

Вместе со скольжением изменяется частота тока ротора.

При неподвижном роторе ( $n_2 = 0$  и  $S = 1$ ) вращающееся поле с одинаковой частотой пересекает проводники обмотки статора и ротора и частота тока в роторе равна частоте тока в сети ( $f_2 = f_1$ ).

При уменьшении скольжения обмотка ротора пересекается магнитным полем с меньшей частотой, так что частота тока в роторе уменьшается. Когда ротор вращается синхронно с полем ( $n_2 = n_1$  и  $S = 0$ ), проводники обмотки ротора не пересекаются магнитным полем, так что частота тока в роторе равна нулю  $f_2 = 0$ . Таким образом, частота тока в роторе пропорциональна скольжению, т. е.  $f_2 = S f_1$ .

Активное сопротивление обмотки ротора почти не зависит от частоты, тогда как ЭДС и реактивное сопротивление пропорциональны частоте, т. е. изменяются с изменением скольжения, и могут быть определены следующими выражениями:  $E_2 = S E$  и  $X_2 = S X$ , где  $E$  и  $X$  — соответственно ЭДС и индуктивное сопротивление фазы обмотки неподвижного ротора. Таким образом, имеем:



$$I_2 = \frac{SE}{\sqrt{R_2^2 + (SX)^2}}; \cos \Psi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (SX)^2}}$$

и вращающий момент

$$M_2 \approx I_2 \cos \Psi_2 = SER_2 / (R_2^2 + (SX)^2)$$

Следовательно, при небольших скольжениях (примерно до 20%), когда  $SX$  мало по сравнению с  $R_2$ , увеличение скольжения вызывает повышение вращающего момента, так как при этом возрастает активная составляющая тока в роторе ( $I_2 \cos \Psi_2$ ).

При больших скольжениях ( $SX > R_2$ ) увеличение скольжения будет вызывать уменьшение вращающего момента.

Таким образом, хотя и возрастает ток в роторе  $I_2$ , но его активная составляющая  $I_2 \cos \Psi_2$  и, следовательно, вращающий момент уменьшатся вследствие значительного повышения реактивного сопротивления обмотки ротора.

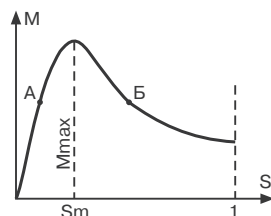


Рис. 7.6. Зависимость вращающего момента асинхронного двигателя от скольжения

На рис. 7.6 показана зависимость вращающего момента от скольжения. При некотором скольжении  $S_m$  (примерно 20%) двигатель развивает максимальный момент, который определяет перегрузочную способность двигателя и обычно в 2—3 раза превышает номинальный момент.



#### Примечание.

Устойчивая работа двигателя возможна только на восходящей ветви кривой зависимости момента от скольжения (рис. 7.6), т. е. при изменении скольжения в пределах от 0 до  $S_m$ .

Работа двигателя на нисходящей ветви указанной зависимости, т. е. при скольжении  $S > S_m$  невозможна, так как не обеспечивается устойчивое равновесие моментов.

Если предположить, что вращающий момент был равен тормозному ( $M = M_T$ ) в точках А и Б, то при случайном нарушении равновесия моментов в одном случае оно восстанавливается, а в другом не восстанавливается.

Допустим, что вращающий момент двигателя почему-либо уменьшился (например, при понижении напряжения сети), тогда скольжение начнет увеличиваться.

Если **равновесие моментов было в точке А**, то увеличение скольжения вызовет увеличение вращающего момента двигателя, и он станет вновь равным тормозному моменту, т. е. равновесие моментов восстановится.

Если же **равновесие моментов было в точке Б**, то увеличение скольжения вызовет уменьшение вращающего момента, который будет оставаться всегда меньше тормозного, т. е. равновесие моментов не восстановится и частота вращения ротора будет непрерывно уменьшаться до полной остановки двигателя.

Если приложить к валу двигателя тормозной момент, больший максимального момента, то равновесие моментов нарушится, и ротор двигателя остановится.



**Примечание.**

*Вращающий момент двигателя пропорционален квадрату приложенного напряжения, ведь пропорциональны напряжению и магнитный поток, и ток в роторе.*

Поэтому изменение напряжения в сети вызывает значительное изменение вращающего момента.

### **Рабочие характеристики асинхронного двигателя**

Рабочие характеристики асинхронного двигателя представляют собой зависимости скольжения  $S$ , частоты вращения ротора  $n_2$ , развиваемого момента  $M$ , потребляемого тока  $I_1$ , расходуемой мощности  $P_1$ , коэффициента мощности  $\cos\varphi$  и КПД  $\eta$  от полезной мощности  $P_2$  на валу машины.

Эти характеристики (рис. 7.7) снимаются при естественных условиях работы двигателя, т. е. двигатель нерегулируемый, частота тока  $f_1$  и напряжение  $U_1$  сети остаются постоянными, а изменяется только нагрузка на валу двигателя.

При увеличении нагрузки на валу двигателя скольжение возрастает, причем при больших нагрузках скольжение увеличивается несколько быстрее, чем при малых.

При холостом ходе двигателя скольжение очень мало ( $n_2 \sim n_1$  или  $S \sim 0$ ).

При номинальной нагрузке скольжение обычно составляет  $S = 3\text{—}5\%$  (0,95).

Частота вращения ротора  $n_2 = n_1(1 - S) = (60f_1/p) \times (1 - S)$ .

При увеличении нагрузки на валу двигателя скольжение возрастает, а частота вращения будет уменьшаться. Однако, изменение частоты вращения при увеличении нагрузки от 0 до номинальной не превышает 5 %. Поэтому скоростная характеристика асинхронного двигателя является жесткой — она имеет очень малый наклон к горизонтальной оси.

Вращающий момент  $M$ , развиваемый двигателем, уравновешен тормозным моментом  $M_t$  на валу и моментом  $M_0$ , идущим на преодоление механических потерь, т. е.

$$M = M_t + M_0 = P_2 / \Omega_2 - M_0$$

где  $P_2$  — полезная мощность двигателя;

$\Omega_2$  — угловая скорость ротора.

При холостом ходе двигателя  $M = M_0$ ; с увеличением нагрузки на валу вращающий момент также увеличивается, причем за счет некоторого уменьшения частоты вращения ротора увеличение вращающего момента происходит быстрее, чем увеличение полезной мощности на валу.

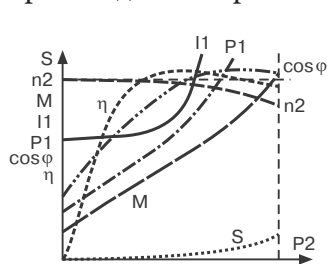


Рис. 7.7. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Ток  $I_1$ , потребляемый двигателем из сети, неравномерно изменяется с увеличением нагрузки на валу двигателя.

При холостом ходе  $\cos \varphi$  мал, а ток имеет большую реактивную составляющую.

При малых нагрузках на валу двигателя активная составляющая статора меньше реактивной составляющей, поэтому активная составляющая тока незначительно влияет на ток  $I_1$ , определяющийся в основном реактивной составляющей.

При больших нагрузках активная составляющая тока статора становится больше реактивной, и изменение нагрузки вызывает большое изменение тока  $I_1$ .

Графически зависимость потребляемой двигателем мощности  $P_1$  выражается прямой линией, незначительно отклоняющейся вверх от прямой при больших нагрузках. Это объясняется увеличением потерь в обмотках статора и ротора с возрастанием нагрузки.

Коэффициент мощности изменяется в зависимости от нагрузки на валу двигателя следующим образом. При холостом ходе  $\cos \varphi$  мал (порядка 0,2), так как активная составляющая тока статора, обуслов-

ленная потерями мощности в машине, мала по сравнению с реактивной составляющей этого тока, создающей магнитный поток.

При увеличении нагрузки на валу  $\cos\varphi$  возрастает (достигая наибольшего значения 0,8—0,95) в результате увеличения активной составляющей тока статора.

При очень больших нагрузках происходит некоторое уменьшение  $\cos\varphi$ , так как вследствие значительного увеличения скольжения и частоты тока в роторе возрастает реактивное сопротивление обмотки ротора.

Кривая КПД  $\eta$  имеет такой же вид, как в любой машине или трансформаторе. При холостом ходе КПД равен нулю. С увеличением нагрузки на валу двигателя КПД резко увеличивается, а затем уменьшается. Наибольшего значения КПД достигает при такой нагрузке, когда потери мощности в стали и механические потери, не зависящие от нагрузки, равны потерям мощности в обмотках статора и ротора, зависящим от нагрузки.

### 7.3. Пуск в ход и регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей. Однофазные асинхронные двигатели

#### Пуск в ход асинхронных двигателей

При включении асинхронного двигателя в сеть переменного тока по обмоткам его статора и ротора будут проходить токи, в несколько раз больше номинальных. Это объясняется тем, что при неподвижном роторе вращающееся магнитное поле пересекает его обмотку с большой частотой, равной частоте вращения магнитного поля в пространстве, и индуцирует в этой обмотке большую ЭДС. Эта ЭДС создает большой ток в цепи ротора, что вызывает возникновение соответствующего тока и в обмотке статора.

При увеличении частоты вращения ротора скольжение уменьшается, что приводит к уменьшению ЭДС и тока в обмотке ротора. Это, в свою очередь, вызывает уменьшение тока в обмотке статора.



#### Примечание.

*Большой пусковой ток нежелателен как для двигателя, так и для источника, от которого двигатель получает энергию. При частых*

*пусках большой ток приводит к резкому повышению температуры обмоток двигателя, что может вызвать преждевременное старение их изоляции.*

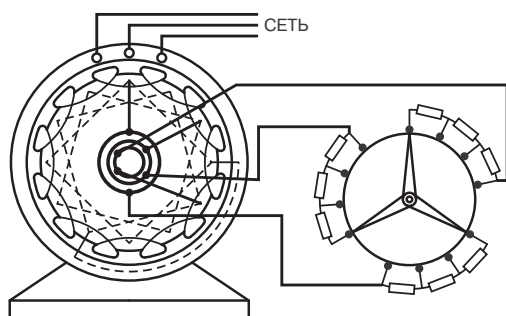
В сети при больших токах понижается напряжение, которое оказывает влияние на работу других приемников энергии, включенных в эту же сеть.

Поэтому прямой пуск двигателя непосредственным включением его в сеть допускается только в том случае, когда мощность двигателя, намного меньше мощности источника энергии, питающего сеть.



**Примечание.**

*Если мощность двигателя соизмерима с мощностью источника энергии, то необходимо уменьшить ток, потребляемый этим двигателем при пуске в ход.*



**Рис. 7.8.** Схема включения пускового реостата в цепь фазного ротора асинхронного двигателя

уменьшается, а, следовательно, уменьшаются токи как в обмотке статора, так и потребляемый двигателем из сети. При этом увеличится активная составляющая тока ротора и, следовательно, вращающий момент, развиваемый двигателем при пуске в ход.

**Пусковые реостаты** имеют несколько контактов, поэтому можно постепенно уменьшать сопротивление, введенное в цепь обмотки ротора. После достижения ротором нормальной частоты вращения реостат полностью выводится, т. е. обмотку ротора замыкают накоротко.

При нормальной частоте ротора скольжение мало и ЭДС, индуцируемая в его обмотке, также незначительна. Поэтому никакие добавочные сопротивления в цепи ротора не нужны.

Двигатели с фазным ротором обладают очень хорошими пусковыми свойствами. Для уменьшения пускового тока обмотку ротора замыкают на активное сопротивление, называемое пусковым реостатом (рис. 7.8).

При включении такого сопротивления в цепь обмотки ротора ток в ней

**Внимание.**

*Пусковые реостаты работают непродолжительное время в процессе разгона двигателя и рассчитываются на кратковременное действие. Если оставить реостат включенным длительное время, то он выйдет из строя.*

Двигатели с короткозамкнутым ротором при малой мощности их по сравнению с мощностью источника энергии пускают в ход непосредственным включением в сеть.

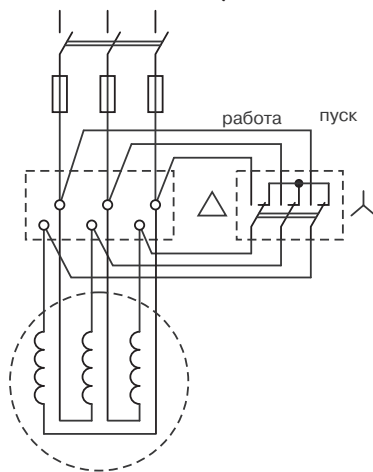
При большой же мощности двигателей пусковой ток уменьшают, понижая приложенное напряжение. Для понижения напряжения на время пуска двигатель включают в сеть через понижающий автотрансформатор или реакторы. При вращении ротора с нормальной частотой вращения двигатель переключают на полное напряжение сети.

**Недостатком** такого способа пуска двигателя в ход является резкое уменьшение пускового момента. Для уменьшения пускового тока в  $N$  раз необходимо приложенное напряжение понизить также в  $N$  раз. При этом пусковой момент, пропорциональный квадрату напряжения, уменьшится в  $N^2$  раз. Таким образом, понижение напряжения допустимо при пуске двигателя без нагрузки или при малых нагрузках, когда пусковой момент может быть небольшим.

Часто двигатель пускают в ход посредством переключения обмотки статора со звезды на треугольник (рис. 7.9). В момент пуска обмотку статора соединяют звездой, а после того как двигатель разовьет частоту вращения, близкую к нормальной, ее переключают треугольником.

При таком способе пуска двигателя в ход пусковой ток в сети уменьшается в три раза по сравнению с пусковым током, который потреблялся бы двигателем, если бы при пуске обмотка статора была соединена треугольником.

Этот способ пуска можно применять для двигателя, обмотка статора которого при питании от сети данного напряжения должна быть соединена треугольником.

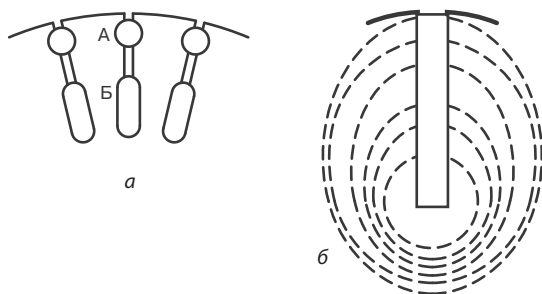


**Рис. 7.9.** Схема пуска короткозамкнутого асинхронного двигателя с переключением обмотки статора со звезды на треугольник

### Двигатели с улучшенными пусковыми свойствами

Простота конструкции и надежность в эксплуатации двигателей с короткозамкнутым ротором являются их существенным достоинством, благодаря чему они получили широкое применение в промышленности. Однако эти двигатели имеют плохие пусковые характеристики.

Значительное улучшение пусковых характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором достигается изменением конструкции ротора: используют роторы с двойной короткозамкнутой обмоткой и с глубокими пазами.



**Рис. 7.10.** Схема устройства ротора:  
а — с двойной короткозамкнутой обмоткой;  
б — с глубокими пазами

Ротор с двойной короткозамкнутой обмоткой был впервые предложен М. О. Доливо-Добровольским в 1889 г. Он имеет две короткозамкнутые обмотки, выполненные в виде беличьих клеток (рис. 7.10, а).

Число пазов верхней А и нижней Б клеток может быть одинаково или различно. Наружная обмотка

А выполнена из стержней малого поперечного сечения, а внутренняя обмотка Б — из стержней большого поперечного сечения. Поэтому активное сопротивление обмотки А оказывается значительно большим, чем активное сопротивление обмотки Б ( $R_A \gg R_B$ ).

Вследствие того что стержни внутренней обмотки Б глубоко погружены в тело ротора и окружены сталью, индуктивное сопротивление внутренней обмотки значительно больше, чем индуктивное сопротивление внешней обмотки ( $X_B \gg X_A$ ).

**Принцип действия** этого двигателя состоит в следующем. В момент включения двигателя в сеть ротор неподвижен и частота тока в роторе равна частоте тока в сети  $f_2 = f_1$ .

Ток в обмотках А и Б распределяется обратно пропорционально их полным сопротивлениям.



#### Примечание.

Так как реактивные сопротивления обмоток асинхронных машин значительно больше их активных сопротивлений, то при пуске в



*ход распределение тока между обмотками А и Б примерно обратно пропорционально их индуктивным сопротивлениям.*

Поэтому при пуске в ход ток в основном протекает по проводникам внешней обмотки А, имеющей меньшее индуктивное и большее активное сопротивление. Эта обмотка называется пусковой.

В рабочем режиме скольжение мало и, следовательно, частота тока в роторе также мала ( $f_2 \approx 0$ ). Поэтому индуктивные сопротивления обмоток не имеют значения и токи в обмотках А и Б обратно пропорциональны их активным сопротивлениям.

Таким образом, в рабочем режиме ток в основном проходит по проводникам внутренней обмотки Б, имеющим меньшее активное сопротивление. Эта обмотка называется **рабочей**. При такой конструкции ротора увеличивается активное сопротивление его обмотки в момент пуска в ход двигателя, что уменьшает пусковой ток и увеличивает пусковой момент также, как включение пускового реостата в цепь фазного ротора.

В двигателях с глубокими пазами на роторе короткозамкнутая обмотка ротора выполняется в виде узких полос (рис. 7.10, б). При такой конструкции обмотки происходит оттеснение тока к верхней части проводников вследствие того, что нижние части проводников сцеплены с большим магнитным потоком рассеяния, чем верхние части.



#### **Вывод.**

*Ток, проходящий по проводникам, стремится сконцентрироваться преимущественно в верхней их части, что равносильно уменьшению поперечного сечения или увеличению активного сопротивления этих проводников.*

Это явление оттеснения тока в верхние части проводников особенно сильно сказывается в момент включения двигателя, когда частота тока в роторе равна частоте тока сети и, следовательно, при пуске в ход повышается активное сопротивление обмотки ротора, что увеличивает пусковой момент.

При увеличении частоты вращения ротора частота тока в его обмотке уменьшается, и ток более равномерно распределяется по сечению стержней. При нормальной частоте вращения неравномерность распределения тока по поперечному сечению стержней почти полностью исчезает.



Пусковой момент двигателей этого типа  $M_{\pi} = (1-1,5)M_n$ , а пусковой ток  $I_{\pi} = (4-5)I_n$ .



#### Вывод.

Таким образом, в двигателях с двойной короткозамкнутой обмоткой и с глубокими пазами пусковые моменты больше и пусковые токи меньше, чем у обычных короткозамкнутых двигателей.

Однако рабочие характеристики этих двигателей несколько хуже, чем обычных короткозамкнутых двигателей: несколько меньше  $\cos\phi$ , КПД и максимальный момент, так как больше потоки рассеяния, т. е. больше индуктивные сопротивления обмоток ротора.

### Регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей

Частота вращения ротора в минуту определяется следующим выражением:

$$n_2 = n_1(1 - S) = (60f_1/p)(1 - S).$$

Из этого выражения видно, что частоту вращения ротора регулировать изменением любой из трех величин, определяющих ее, т. е. изменением частоты тока сети  $f_1$ , числа пар полюсов  $p$  и скольжения  $S$ .

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей изменением частоты тока сети сложно, так как необходим какой-либо регулирующий преобразователь частоты или генератор. Поэтому этот способ не имеет широкого применения.

Число полюсов машины может быть изменено, если на статоре имеется несколько обмоток (обычно две) с различным числом полюсов или одна обмотка, которую можно переключать на различное число полюсов, или две обмотки, каждая из которых может переключаться на различное число полюсов.

На рис. 7.11, а схематически показаны две обмотки одной фазы, соединенные последова-

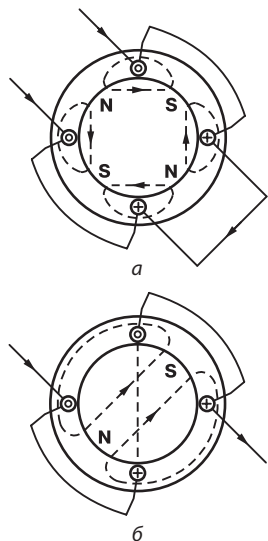


Рис. 7.11. Схемы переключения обмотки статора на разное число полюсов:  
а — четыре полюса;  
б — два полюса

тельно, которые могут быть переключены на четыре полюса. Если изменить направление тока в одной из катушек, включив ее встречно с другой, то обмотка может переключаться на два полюса (рис. 7.11, б).

При изменении числа полюсов обмотки статора изменится частота вращения его магнитного поля, а, следовательно, и частота вращения ротора двигателя.



**Примечание.**

*Этот способ регулирования частоты вращения асинхронного двигателя экономичен, но **недостатком** его является ступенчатое изменение частоты. Кроме того, стоимость такого двигателя значительно возрастает вследствие усложнения обмотки статора и увеличения габаритов машин.*

Регулирование частоты вращения изменением числа полюсов применяют в двигателях с короткозамкнутым ротором; в двигателях с фазным ротором этот способ не используется, так как приходится одновременно изменять число полюсов обмотки статора и число полюсов обмотки вращающегося ротора, что весьма сложно.

Обычно встречаются двигатели с синхронными частотами вращения 500-750-1000-1500 об/мин. Такие двигатели имеют на статоре две обмотки, каждая из которых может быть переключена на различное число полюсов.

Скольжение можно изменять **регулирующим реостатом**, введенным в цепь обмотки ротора, а также регулированием напряжения сети.

При регулировании напряжения питающей сети изменяется вращающий момент двигателя пропорционально квадрату напряжения. При уменьшении вращающего момента уменьшится частота вращения ротора, т. е. увеличится скольжение.



**Примечание.**

*Регулирующий реостат включается в цепь обмотки фазного ротора подобно пусковому реостату, но в отличие от пускового он рассчитывается на длительное прохождение тока.*

При включении регулирующего реостата ток в роторе уменьшится. Это вызывает снижение вращающего момента двигателя и, следовательно, уменьшение частоты вращения или увеличение скольжения.

При увеличении скольжения увеличивается ЭДС и ток в роторе. Частота вращения или скольжение будет изменяться до восстановления равновесия моментов, т. е. пока ток в роторе не примет своего начального значения.

Этот способ регулирования частоты вращения может быть использован только в двигателях с **фазным ротором**. Несмотря на то, что он является неэкономичным (так как в регулировочном реостате происходит значительная потеря энергии), этот двигатель имеет широкое распространение.

### Однофазные асинхронные двигатели

Однофазные асинхронные двигатели широко применяют при небольших мощностях (до 1—2 кВт). Такой двигатель отличается от трехфазного тем, что на статоре его помещается однофазная обмотка. Ротор однофазного асинхронного двигателя имеет фазную или короткозамкнутую обмотку.



#### Примечание.

***Особенностью** однофазных асинхронных двигателей является отсутствие начального или пускового момента, т. е. при включении такого двигателя в сеть ротор его будет оставаться неподвижным.*

Если же под действием какой-либо внешней силы вывести ротор из состояния покоя, то двигатель будет развивать вращающий момент.

Отсутствие начального момента является существенным недостатком однофазных асинхронных двигателей. Поэтому они всегда **снабжаются пусковым устройством**.

Наиболее простым пусковым устройством являются две обмотки, помещенные на статоре, сдвинутые одна относительно другого на половину полюсного деления ( $90^\circ$  электрических). Эти обмотки катушек питаются от симметричной двухфазной сети, т. е. напряжения, приложенного к обмоткам катушек, равны между собой и сдвинуты на четверть периода по фазе.

При таких напряжениях токи, проходящие по катушкам, также сдвинуты по фазе на четверть периода, что в дополнение к пространственному сдвигу катушек дает возможность получить вращающееся магнитное поле.

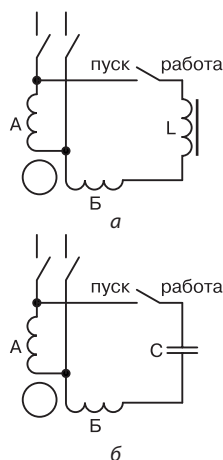
При наличии вращающегося магнитного поля двигатель развивает **пусковой момент**. В действительности двухфазная сеть обычно отсутствует, и пуск однофазного двигателя осуществляется включением двух в одну общую для них однофазную сеть.

Для получения угла сдвига фаз между токами в катушках, примерно равного  $\pm\pi/2$  (четверти периода), одну из катушек (рабочую) включают в сеть непосредственно или с пусковым активным сопротивлением, а вторую катушку (пусковую) — через индуктивную катушку (рис. 7.12, а) или конденсатор (рис. 7.12, б). Пусковая обмотка включается только на период пуска в ход.



#### Примечание.

*В момент, когда ротор приобретает определенную частоту вращения, пусковая обмотка отключается от сети центробежным выключателем или специальным реле; двигатель работает как однофазный.*



**Рис. 7.12.** Схема пуска однофазного двигателя при включении в цепь пусковой обмотки: (а) индуктивности, (б) емкости

В качестве однофазного двигателя может быть использован любой трехфазный асинхронный двигатель. При работе трехфазного двигателя в качестве однофазного рабочая или главная обмотка, состоящая из двух последовательно соединенных фаз, включается непосредственно в однофазную сеть, третья фаза, являющаяся пусковой или вспомогательной обмоткой, включается в ту же сеть через пусковой элемент — сопротивление, индуктивность или конденсатор.

**Конденсаторный (двухфазный) двигатель** представляет собой однофазный асинхронный двигатель с двумя обмотками на статоре и короткозамкнутым ротором. Вспомогательная обмотка рассчитана на длительное прохождение тока и остается включенной не только при пуске в ход двигателя, но и при работе.

При работе конденсаторного двигателя возникает вращающееся поле, наличие которого улучшает его рабочие свойства в сравнении с однофазными. При увеличении емкости конденсатора возрастает и пусковой момент двигателя. Однако увеличение емкости батареи конденсаторов в рабочем режиме нежелательно, так как это ведет к снижению частоты вращения и КПД двигателя.

## 7.4. Вопросы для тестирования

### **Вопрос №1.**

Частота вращения магнитного поля асинхронного двигателя  $n_1 = 1000$  об/мин. Частота вращения ротора  $n_2 = 950$  об/мин. Определить скольжение.

а)  $s = 0,05$ ; б)  $s = 0,5$ ; в)  $s = 0,1$ ; г) для решения задачи недостаточно данных.

### **Вопрос №2.**

Укажите основной недостаток асинхронного двигателя.

а) Зависимость частоты вращения от момента на валу; б) отсутствие экономичных устройств для плавного регулирования частоты вращения ротора; в) низкий КПД; г) нет недостатков.

### **Вопрос №3.**

Частота вращения магнитного поля асинхронного двигателя  $n_1 = 1500$  об/мин, частота вращения ротора  $n_2 = 1470$  об/мин. Определить скольжения  $s$ .

а)  $s = 0,03$ ; б)  $s = 0,01$ ; в)  $s = 0,02$ ; г) для решения задачи недостаточно данных.

### **Вопрос №4.**

С какой целью асинхронный двигатель с фазным ротором снабжают контактными кольцами и щетками?

а) Для соединения ротора с регулировочным реостатом; б) для соединения статора с регулировочным реостатом; в) для подключения двигателя к сети; г) для измерения тока в роторе.

### **Вопрос №5.**

Чему равен КПД асинхронного двигателя, работающего в режиме холостого хода?

а) 1; б) 90%; в) 0; г) для ответа на вопрос недостаточно данных.

### **Вопрос №6.**

В трехфазную сеть с линейным напряжением 380 В включают трехфазный асинхронный двигатель, каждая из обмоток которого рассчитана на 220 В. Как следует соединить обмотки двигателя?

*а) Треугольником; б) по-всякому; в) двигатель нельзя включить в эту сеть; г) звездой.*

**Вопрос №7.**

При регулировании частоты вращения магнитного поля  $n$ , асинхронного двигателя были получены следующие величины: 1500; 1000; 750 об/мин. Каким способом осуществлялось регулирование частоты вращения?

*а) Частотное регулирование; б) полюсное регулирование; в) реостатное регулирование; г) регулирование величиной напряжения.*

**Вопрос №8.**

Определить частоту вращения магнитного поля статора  $n$ , асинхронного короткозамкнутого двигателя, если число пар полюсов  $p = 1$ , частота изменения тока  $f = 50$  Гц.

*а)  $n = 3000$  об/мин; б)  $n = 1500$  об/мин; в)  $n = 1000$  об/мин; г)  $n = 2500$  об/мин.*

**Вопрос №9.**

Как изменить направление вращения магнитного поля статора асинхронного трехфазного двигателя?

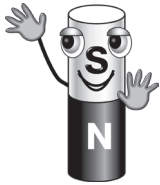
*а) Достаточно изменить порядок чередования всех трех фаз; б) достаточно изменить порядок чередования двух фаз из трех; в) переключить со «звезды» на «треугольник»; г) это невозможно.*

**Вопрос №10.**

Увеличение емкости батареи конденсаторов в рабочем режиме однофазного асинхронного электродвигателя ведет:

*а) ... к устойчивой работе; б) ... к увеличению частоты вращения и КПД двигателя; в) ... к снижению частоты вращения и КПД двигателя; г) ... к перегрузке.*

## ЗНАКОМЬТЕСЬ: СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ И ГЕНЕРАТОРЫ



*Сделав ВОСЬМОЙ шаг, вы изучите синхронные машины (двигатели и генераторы), скорость вращения ротора в которых определяется частотой тока сети и числом пар полюсов. Вы рассмотрите принцип действия и устройство синхронного генератора и двигателя, их работу под нагрузкой. И в завершении — ответите на вопросы для самотестирования.*

### 8.1. Принцип действия и устройство синхронного генератора

#### Схема синхронного генератора

В синхронных машинах частота вращения ротора равна частоте вращения магнитного поля статора и, следовательно, определяется частотой тока сети и числом пар полюсов, т. е.  $n = 60f/p$  и  $f = pn/60$ .



#### Примечание.

*Как и всякая электрическая машина, синхронная машина обратима, т. е. может работать как генератором, так и двигателем.*

Электрическая энергия вырабатывается синхронными генераторами, первичными двигателями которых являются:

- ♦ либо гидравлические турбины;
- ♦ либо паровые турбины;
- ♦ либо двигатели внутреннего сгорания.

Обычно обмотки возбуждения получают энергию от возбудителя, который представляет собой генератор постоянного тока.

**Возбудитель** находится на одном валу с рабочей машиной. Его мощность составляет малую величину, порядка 1—5% мощности синхронной машины, возбуждаемой им.

При небольшой мощности часто используются схемы питания обмоток возбуждения синхронных машин от сети переменного тока через полупроводниковые выпрямители.

Простейшим генератором может быть виток из провода, вращающийся в магнитном поле (**рис. 8.1**). Магнитное поле возбуждается током обмотки возбуждения, помещенной на полюсах статора N-S.

При вращении витка проводники пересекают магнитное поле, созданное между полюсами N-S, вследствие чего в витке будет индуцироваться ЭДС.

Концы витка соединены с кольцами, вращающимися вместе с витком. Если на кольцах поместить неподвижные щетки и соединить их с приемником электрической энергии, то по замкнутой цепи, состоящей из витка, колец, щеток и приемника энергии, пойдет электрический ток под действием ЭДС.

Полученная в таком простейшем генераторе ЭДС будет непрерывно изменяться в зависимости от положения витка в магнитном поле. Когда проводники находятся под осями полюсов (**рис. 8.1**), то при вращении витка они пересекают в единицу времени наибольшее число линий магнитного поля. Следовательно, в данный момент индуцируемая в витке ЭДС будет иметь наибольшее значение.

В дальнейшем при повороте витка изменится число линий магнитного поля, пересекаемых в единицу времени проводниками. При повороте витка на  $90^\circ$  в пространстве проводники будут перемещаться в вертикальном направлении, совпадающем с направлением магнитных линий поля. Следовательно, проводники не пересекают магнитных линий и ЭДС в витке равна нулю.

При повороте витка на угол, больший  $90^\circ$ , изменится направление перемещения этих проводников в магнитное поле, а, следовательно, и направление ЭДС, индуцируемой в витке.

Если магнитное поле между полюсами N и S распределяется равномерно, то ЭДС будет меняться во времени синусоидально. За один оборот витка в пространстве ЭДС, индуцируемая в нем, претерпевает один период изменения.



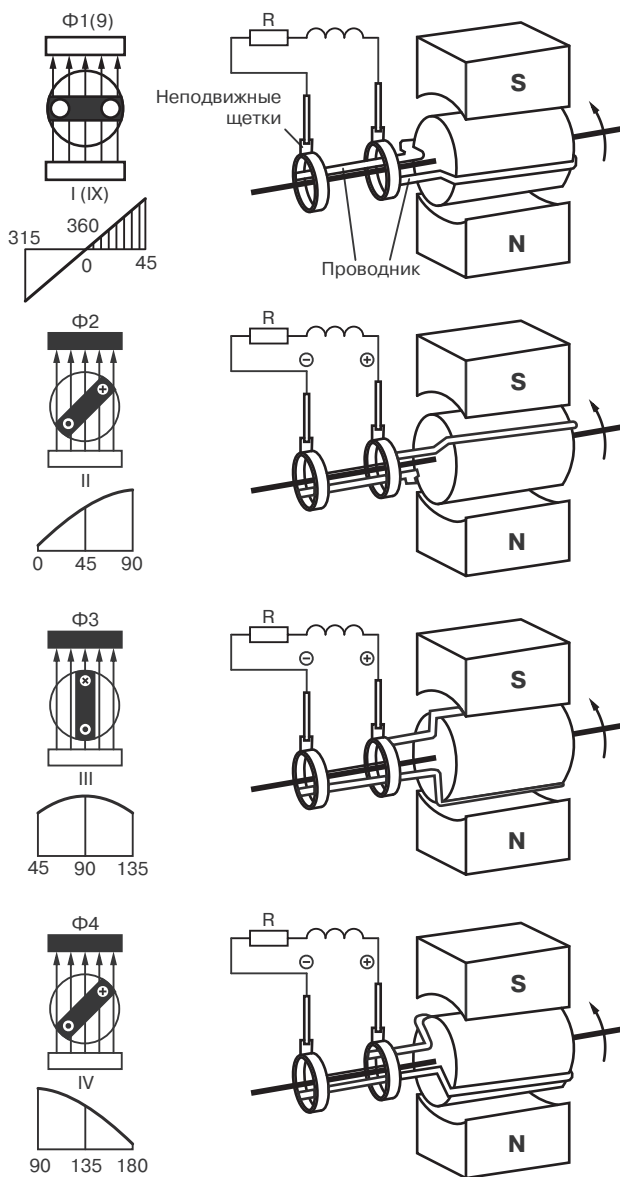
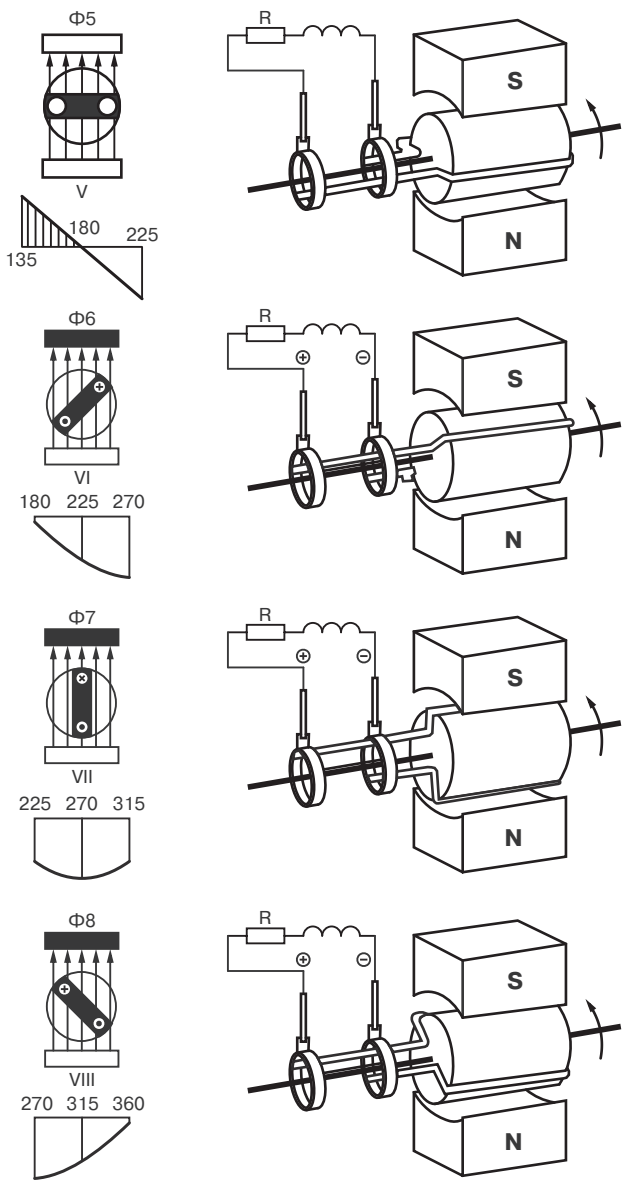


Рис. 8.1. Схема работы генератора переменного тока



Если виток вращается при помощи какого-либо первичного двигателя с постоянной частотой вращения  $n$  в минуту, то в этом витке индуцируется переменная ЭДС с частотой  $f = n/60$ .

### Устройство синхронного генератора

Возникновение ЭДС в проводниках возможно как при перемещении этих проводников в неподвижном магнитном поле, так и при перемещении магнитного поля относительно неподвижных проводников.

**В первом случае** полюсы, т. е. индуцирующая часть машины, возбуждающая магнитное поле, помещаются на неподвижной части машины (на статоре), а индуцируемая часть (якорь), т. е. проводники, в которых создается ЭДС, на вращающейся части машины (на роторе).

**Во втором случае** полюсы помещаются на роторе, а якорь — на статоре.

Выше мы рассмотрели принцип действия синхронного генератора с неподвижными полюсами и вращающимся якорем. В таком генераторе энергия, вырабатываемая им, передается приемнику энергии посредством скользящих контактов — контактных колец и щеток.

Скользящий контакт в цепи большой мощности создает значительные потери энергии, а при высоких напряжениях наличие такого контакта крайне нежелательно. Поэтому генераторы с вращающимся якорем и неподвижными полюсами выполняют только при невысоких напряжениях (до 380/220 В) и небольших мощностях (до 15 кВА).

Наиболее широкое применение получили синхронные генераторы, в которых полюсы помещены на роторе, а якорь — на статоре.

Ток возбуждения протекает по обмотке возбуждения, которая представляет собой последовательно соединенные катушки, помещенные на полюсы ротора.

Концы обмотки возбуждения соединены с контактными кольцами, которые крепятся на валу машины. На кольцах помещаются неподвижные щетки, посредством которых в обмотку возбуждения подводится постоянный ток от постороннего источника энергии — генератора постоянного тока, называемого возбудителем.

На **рис. 8.2** показан общий вид синхронного генератора с возбудителем. Устройство статора синхронного генератора аналогично устройству статора асинхронной машины.

Ротор синхронных генераторов выполняют либо с явно выраженными (выступающими) полюсами, либо с неявно выраженными

полюсами, т. е. без выступающих полюсов.

В машинах с относительно малой частотой вращения (при большом числе полюсов) роторы должны быть с явно выраженными полюсами (рис. 8.3, а), равномерно расположенными по окружности ротора. Полюс состоит из сердечника, полюсного наконечника и катушки обмотки возбуждения, помещаемой на сердечнике полюса.

Первичные двигатели синхронных генераторов с явно выраженными полюсами обычно представляют собой гидравлические турбины, являющиеся тихоходными машинами.

При большой частоте вращения такое устройство ротора не может обеспечить нужной механической прочности и поэтому у высокоскоростных машин роторы выполняют с неявно выраженными полюсами (рис. 8.3, б).

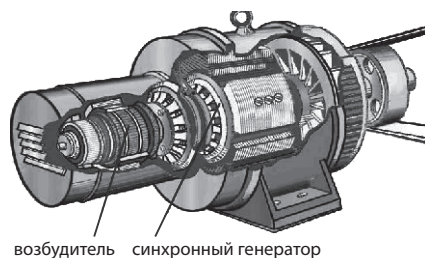


Рис. 8.2. Устройство синхронного генератора

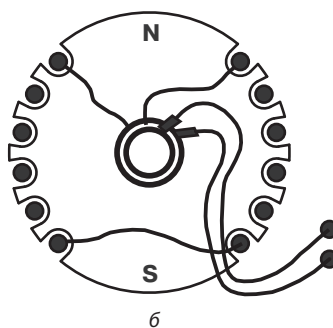
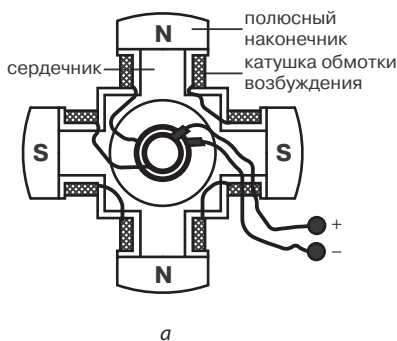


Рис. 8.3. Ротор синхронной машины:

а — с явно выраженными полюсами; б — с неявно выраженными полюсами

Сердечники роторов с неявно выраженными полюсами обычно изготавливают из цельных поковок, на поверхности которых фрезеруются пазы. После укладки обмоток возбуждения на роторе пазы его забиваются клиньями, а лобовые соединения обмотки возбуждения укрепляются стальными бандажами, помещенными на торцовых частях ротора. При такой конструкции ротора допускаются большие частоты вращения.

Для генераторов с неявно выраженными полюсами первичными двигателями обычно являются паровые турбины, принадлежащие к числу быстроходных машин.

## 8.2. Работа синхронного генератора под нагрузкой

Если синхронный генератор не нагружен, т. е. работает вхолостую, то тока в обмотках статора нет. Магнитный поток полюсов, созданный током возбуждения, индуцирует в трехфазной обмотке статора ЭДС. При нагрузке генератора по обмотке статора протекает ток.

При симметричной нагрузке токи в фазах обмотки статора равны и сдвинуты на  $1/3$  периода. Токи статора создают вращающееся магнитное поле, частота вращения которого  $n_1 = 60f/p = n$ , т. е. магнитное поле, созданное токами в обмотке статора, вращается синхронно с магнитным полем полюсов.

В обмотке статора синхронного генератора создается ЭДС, величина которой зависит от магнитного потока полюсов.

Если магнитный поток полюсов очень мал, то и ЭДС также мала. При увеличении магнитного потока возрастает и ЭДС машины.



### Вывод.

*Таким образом, при постоянной частоте вращения ротора ЭДС пропорциональна магнитному потоку, который возбуждается постоянным током, протекающим по проводникам обмотки возбуждения.*

Если повысить ток в обмотке возбуждения, то возрастет и магнитный поток полюсов, что вызовет увеличение ЭДС машины.

Следовательно, изменение тока в обмотке возбуждения вызывает соответствующее изменение ЭДС машины и позволяет регулировать напряжение на зажимах генератора.

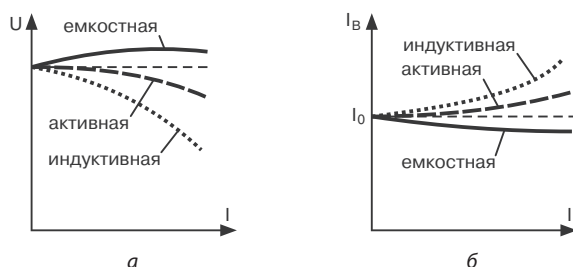
При холостом ходе синхронного генератора напряжение равно ЭДС, индуцированной в обмотке статора.

При нагрузке генератора напряжение не равно ЭДС, так как в сопротивлении (активном и реактивном) обмотки статора возникает падение напряжения.

А токи, проходящие по обмоткам статора, создают **поток реакции якоря**, который воздействует на поток полюсов, так что при нагрузке магнитный поток не будет равен магнитному потоку полюсов при холостой работе генератора.

Поэтому изменение нагрузки, т. е. тока в статоре генератора, будет вызывать изменение напряжения на зажимах генератора в случае, если ток в обмотке возбуждения остается неизменным.

На **рис. 8.4, а** изображены внешние характеристики синхронного генератора при активной и реактивной нагрузках.



**Рис. 8.4.** Характеристики синхронного генератора:  
а — внешние; б — регулировочные

Эти характеристики показывают зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при неизменных частоте вращения ротора и токе возбуждения.

Различный вид этих характеристик при активной, индуктивной и емкостной нагрузках объясняется неодинаковым воздействием поля реакции якоря на магнитный поток полюсов.

Для нормальной работы любого приемника электрической энергии требуется **постоянное напряжение сети**. Чтобы обеспечить постоянное напряжение сети при изменении нагрузки в синхронном генераторе, изменяют и ток возбуждения.



#### **Определение.**

Зависимость, показывающая, каким образом необходимо изменить ток в обмотке возбуждения для того, чтобы при изменении нагрузки генератора напряжение на его зажимах оставалось неизменным, называется **регулировочной характеристикой** (рис. 8.4, б).

При активной нагрузке увеличение тока в статоре вызывает незначительное понижение напряжения, так как реакция якоря уменьшает

магнитный поток в малой степени. При этой нагрузке требуется незначительно увеличить ток возбуждения для обеспечения постоянства напряжения.

При индуктивной нагрузке создается размагничивающее поле реакции якоря, уменьшающее поток полюсов. Поэтому для постоянства напряжения (т. е. для постоянства результирующего магнитного потока) необходимо в большей мере увеличить ток возбуждения для компенсации размагничивающего поля реакции якоря.

При емкостной нагрузке происходит усиление магнитного поля и для постоянства напряжения следует уменьшить ток возбуждения при увеличении тока в статоре.

Наиболее часто синхронные генераторы работают на общую мощную сеть электростанции или энергосистемы. Напряжение такой сети  $U_c$  и частота тока в ней неизменны. ЭДС генератора  $e_r$  равна и противоположна напряжению сети  $e_r = -u_c$ .

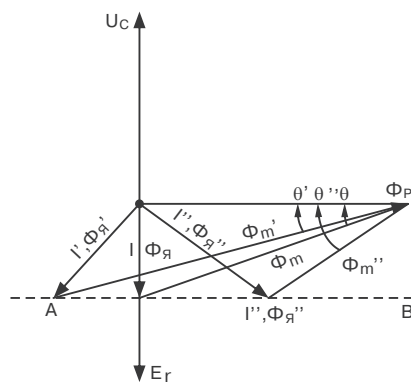


Рис. 8.5. Векторная диаграмма синхронного генератора при различных токах возбуждения

Результирующее магнитное поле  $\Phi_p$  статора, вращающееся с частотой  $n_1 = 60f/p$  в пространстве, опережает напряжение  $E_r$  на  $90^\circ$  (рис. 8.5).

При неизменном напряжении сети  $U_c$  амплитуда магнитного потока  $\Phi_p$  результирующего магнитного поля статора также неизменна.

При активной нагрузке генератора ток статора  $I$  совпадает по фазе с напряжением  $U_r$ . Поток реакции якоря  $\Phi_я$  совпадает по фазе с током  $I$ , так что вектор тока в статоре  $I$  в другом масштабе определит вектор  $\Phi_я$ .

Результирующий магнитный поток создается действием потока полюсов  $\Phi_m$  и потока реакции якоря  $\Phi_я$  и может быть представлен геометрической суммой этих магнитных потоков.

Изменение тока возбуждения генератора не вызывает изменения его активной мощности, так как мощность, потребляемая им от первичного двигателя, остается неизменной (вращающий момент первичного двигателя и частота вращения постоянны).

Поэтому активная составляющая тока статора постоянна и конец вектора  $I$  ( $\Phi_я$ ) находится на прямой  $AB$ , параллельной горизонтальной оси.

Если увеличить ток возбуждения, то возрастет поток полюсов  $\Phi_m'$ , вектор которого находится между прямой  $AB$  и концом неизменного вектора  $\Phi_p$ .

В этом случае изменится как по величине, так и по направлению вектор  $\Gamma'$  и  $\Phi_y'$ , т. е. ток окажется отстающим по фазе от напряжения генератора.

При уменьшении тока возбуждения уменьшится также и поток полюсов  $\Phi_m''$ , что приведет к изменению тока в статоре  $\Gamma''$  ( $\Phi_y''$ ) как по величине, так и по фазе.

Таким образом, изменение тока возбуждения генератора, работающего на мощную сеть, вызывает изменение реактивной составляющей тока в статоре, т. е. изменяет реактивную мощность, вырабатываемую генератором.

Для изменения активной мощности необходимо изменить вращающий момент первичного двигателя, приводящего во вращение ротор синхронного генератора.

Под действием вращающего момента первичного двигателя  $M_1$  ротор машины с помещенными на нем полюсами приводится во вращение с частотой вращения в минуту  $n$ .

Результирующее поле статора вращается в том же направлении с частотой  $n_1 = n$  (рис. 8.6, а).

Следовательно, поле полюсов  $\Phi_m$  и результирующее поле статора  $\Phi_p$  вращаются синхронно, оставаясь неподвижными друг относительно друга, и между этими полями устанавливается взаимодействие. В результате создается электромагнитный тормозной момент  $M_3$ , уравновешивающий момент первичного двигателя.

При равновесии моментов  $M_1 = M_3$  угол между осями магнитных полей  $\theta$  остается неизменным.

Если увеличить момент первичного двигателя  $M_1'$  (рис. 8.6, б), то он окажется больше тормозного, и ротор, получив некоторое ускорение, начнет перемещаться относительно поля статора, вращающегося с постоянной частотой  $n_1 = 60f/p$  (частота тока сети  $f$  постоянна).

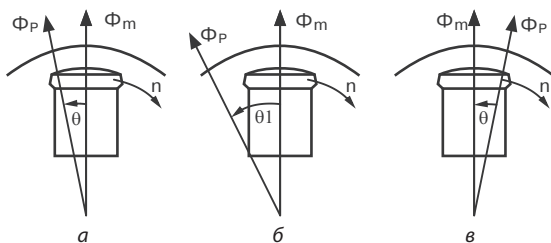


Рис. 8.6. Угол между осями магнитных полей ротора и статора при меньшем (а), большем (б) моментах первичного двигателя и при работе синхронной машины двигателем (в)



При этом угол между осями магнитных полей ротора и статора  $\theta_1$  возрастет, увеличивая тормозной электромагнитный момент  $M_3$ , так, что вновь восстановится равновесие моментов, т. е.  $M_1' = M_3'$ .

Для включения генератора в сеть необходимо:

- ♦ одинаковое чередование фаз в сети и генераторе;
- ♦ равенство напряжения сети и ЭДС генератора;
- ♦ равенство частот ЭДС генератора и напряжения сети;
- ♦ включать генератор в тот момент, когда ЭДС генератора в каждой фазе направлена встречно напряжению сети.

Невыполнение этих условий ведет к тому, что в момент включения генератора в сеть возникают токи, которые могут оказаться большими и вывести из строя генератор.

При включении генераторов в сеть используют специальные устройства — **синхроноскопы**.

Простейшим синхроноскопом являются три лампы накаливания, включаемые между зажимами генератора и контактами сети. Лампы должны быть рассчитаны на двойное напряжение сети, и до включения генератора будут одновременно загораться и погасать.

В момент, когда ЭДС генератора равна и направлена встречно напряжению сети, лампы погаснут, так как напряжение на каждой лампе равно нулю. При погасании ламп генератор включается в сеть.

До включения генератора в сеть ЭДС его измеряется вольтметром и регулированием тока возбуждения устанавливают ее, равной напряжению сети. Частота ЭДС генератора регулируется изменением частоты вращения первичного двигателя.

### 8.3. Синхронные двигатели

Синхронный двигатель не имеет принципиальных конструктивных отличий от синхронного генератора. Также как и в генераторе, на статоре синхронного двигателя помещается трехфазная обмотка, при включении которой в сеть трехфазного переменного тока будет создано вращающееся магнитное поле  $\Phi_p$ , частота вращения в минуту которого  $n_1 = 60f/p$ .

На роторе двигателя помещена обмотка возбуждения, включаемая в сеть источника постоянного тока. Ток возбуждения создает магнитный поток полюсов  $\Phi_m$ . Вращающееся магнитное поле, полученное токами обмотки статора, увлекает за собой полюсы ротора (рис. 8.6, в).

**Примечание.**

*При этом ротор может вращаться только синхронно с полем, т. е. с частотой, равной частоте вращения поля статора. Таким образом, частота вращения синхронного двигателя строго постоянна, если неизменна частота тока питающей сети.*

Основным достоинством синхронных двигателей является возможность их работы с потреблением опережающего тока, т. е. двигатель может представлять собой емкостную нагрузку для сети. Такой двигатель повышает  $\cos\varphi$  всего предприятия, компенсируя реактивную мощность других приемников энергии.

Также как и в генераторах, в синхронных двигателях изменение реактивной мощности, т. е. изменение  $\cos\varphi$ , достигается регулированием тока возбуждения. При некотором токе возбуждения, соответствующем нормальному возбуждению,  $\cos\varphi = 1$ . Уменьшение тока возбуждения вызывает появление отстающего (индуктивного) тока в статоре, а при увеличении тока возбуждения (перевозбужденный двигатель) — опережающего (емкостного) тока в статоре.

Достоинством синхронных двигателей является также меньшая, чем у асинхронных, чувствительность к изменению напряжения питающей сети. У синхронных двигателей вращающий момент пропорционален напряжению сети в первой степени, тогда как у асинхронных — квадрату напряжения.

Вращающий момент синхронного двигателя создается в результате взаимодействия магнитного поля статора с магнитным полем полюсов. От напряжения питающей сети зависит только магнитный поток поля статора.

Синхронные двигатели выполняют преимущественно с явно выраженными полюсами, и работают они в нормальном режиме с опережающим током при  $\cos\varphi = 0,8$ .

Возбуждение синхронные двигатели получают либо от возбуждителя, либо от сети переменного тока через полупроводниковые выпрямители.

**Примечание.**

*Пуск в ход синхронного двигателя непосредственным включением его в сеть невозможен, так как при включении обмотки статора в сеть создается вращающееся магнитное поле, а ротор в момент включения неподвижен.*

Поэтому для пуска в ход двигателя необходимо предварительно довести частоту вращения ротора до синхронной частоты или близкой к ней.

В настоящее время исключительное применение имеет так называемый **асинхронный пуск синхронных двигателей**, сущность которого заключается в следующем.

В полюсных наконечниках ротора синхронного двигателя уложена **пусковая обмотка**, выполненная в виде беличьего колеса наподобие короткозамкнутой обмотки ротора асинхронной машины. Обмотка статора двигателя включается в трехфазную сеть, и пуск его производится так же, как и пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

После того как двигатель разовьет частоту, близкую к синхронной (примерно 95%), обмотка возбуждения включается в сеть постоянного тока, и двигатель входит в синхронизм, т. е. частота ротора увеличивается до синхронной.

При пуске в ход двигателя обмотка возбуждения замыкается на сопротивление, примерно в 10—12 раз большее сопротивление самой обмотки.



#### **Внимание.**

*Нельзя обмотку возбуждения при пуске в ход оставить разомкнутой или замкнуть накоротко. Если при пуске в ход обмотка возбуждения окажется разомкнутой, то в ней будет индуцироваться очень большая ЭДС, опасная как для изоляции обмотки, так и для обслуживающего персонала.*

Создание ЭДС большой величины объясняется тем, что при пуске в ход поле статора вращается с большой частотой относительно неподвижного ротора и с большой частотой пересекает проводники обмотки возбуждения, имеющей число витков.

Работа синхронной машины с потреблением из сети переменного тока дает возможность использовать ее в качестве компенсатора.

Компенсатором является синхронный двигатель, работающий без нагрузки и предназначенный для повышения  $\cos\varphi$  предприятия.

Конструктивно компенсатор отличается от синхронного двигателя незначительно. Компенсатор не несет механической нагрузки, поэтому его вал и ротор легче, а воздушный зазор меньше, чем у двигателя.

Основным недостатком **синхронных двигателей** является потребность в источнике как переменного, так и постоянного тока.

Потребность в источнике постоянного тока для питания обмотки возбуждения синхронного двигателя делает его крайне неэкономичным при небольших мощностях.

Поэтому при малых мощностях синхронные двигатели с возбуждением постоянным током не находят применения и рассмотреть, на примере, мы их не сможем.

## 8.4. Вопросы для тестирования

### **Вопрос №1.**

Синхронизм синхронного генератора, работающего в энергосистеме невозможен, если:

*а) ... вращающий момент турбины больше амплитуды электромагнитного момента; б) ... вращающий момент турбины меньше амплитуды электромагнитного момента; в) ... всегда возможен; г) эти моменты равны.*

### **Вопрос №2.**

С какой целью на роторе синхронного двигателя иногда размещают дополнительную короткозамкнутую обмотку?

*а) Для увеличения КПД; б) для регулирования скорости вращения; в) для раскручивания ротора при запуске; г) для увеличения вращающего момента.*

### **Вопрос №3.**

Каким должен быть зазор между ротором и статором синхронного генератора для обеспечения синусоидальной формы индуцируемой ЭДС?

*а) «Увеличивающимся» от середины к краям полюсного наконечника; б) «уменьшающимся» от середины к краям полюсного наконечника; в) волнистым; г) строго одинаковым по всей окружности ротора.*

### **Вопрос №4.**

К какому источнику электрической энергии подключается обмотка статора синхронного двигателя?

*а) К источнику постоянного тока; б) к источнику однофазного переменного тока; в) к источнику двухфазного переменного тока; г) к источнику трехфазного тока.*

**Вопрос №5.**

В качестве каких устройств используются синхронные машины?

*а) Двигатели; б) генераторы; в) синхронные компенсаторы; г) всех перечисленных.*

**Вопрос №6.**

Турбогенератор с числом пар полюсов  $p = 1$  и частотой вращения магнитного поля  $n = 3000$  об/мин. Определить частоту тока  $f$ .

*а) 250 Гц; б) 50 Гц; в) 5 Гц; г) 500 Гц.*

**Вопрос №7.**

При работе синхронной машины в режиме двигателя электромагнитный момент является...

*а) ... вращающим; б) ... нулевым; в) ... тормозящим; г) ... ускоряющим.*

**Вопрос №8.**

Включение синхронного генератора в энергосистему производится:

*а) ... в режиме холостого хода; б) ... в режиме короткого замыкания; в) ... в рабочем режиме; г) ... в режиме возбуждения.*

**Вопрос №9.**

Каким образом, возможно, изменять в широких пределах коэффициент мощности синхронного двигателя?

*а) Воздействуя на ток в обмотке статора двигателя; б) воздействуя на ток возбуждения двигателя; в) меняя напряжение сети; г) это сделать невозможно.*

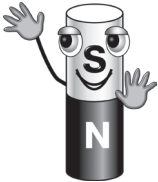
**Вопрос №10.**

Для включения генератора в сеть необходимо одно из условий:

*а) ... разное чередование фаз в сети и генераторе; б) ... большая мощность генератора; в) ... одинаковое чередование фаз в сети и генераторе; г) ... разность частот ЭДС генератора и напряжения сети.*

## ДЕВЯТЫЙ ШАГ

# КАК УСТРОЕНЫ И РАБОТАЮТ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА



*Сделав ДЕВЯТЫЙ шаг, вы познакомитесь с машинами (двигателями и генераторами) постоянного тока, рассмотрев такие вопросы. Принцип действия и устройство генератора постоянного тока. Обмотки якорей и ЭДС постоянного тока. Магнитное поле машины при нагрузке постоянного тока. Способы возбуждения генераторов. Характеристики генераторов постоянного тока. Пуск, характеристики, регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока. Потери и КПД машин постоянного тока. И в завершении — ответите на вопросы для само тестирования.*

## 9.1. Принцип действия и устройство генератора постоянного тока

Простейшим генератором является виток, вращающийся в магнитном поле полюсов N и S (рис. 9.1). В таком витке индуцируется переменная во времени ЭДС. Поэтому при соединении концов витка с контактными кольцами, вращающимися вместе с витком, в нагрузке через неподвижные щетки протекает переменный ток, т. е. такая машина является генератором переменного тока.

Для преобразования переменного тока в постоянный применяют коллектор, принцип действия которого состоит в следующем. Концы каждого витка (рис. 9.1) присоединены к двум медным полукольцам (сегментам), называемым коллекторными пластинами.

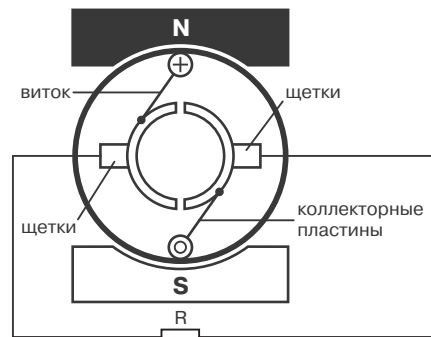


Рис. 9.1. Генератор постоянного тока

Пластины жестко укреплены на валу машины и изолированы как друг от друга, так и от вала. На пластинах помещены неподвижные щетки, электрически соединенные с приемником энергии.

При вращении витка коллекторные пластины также вращаются вместе с валом машины. Каждая из неподвижных щеток соприкасается то с одной, то с другой пластиной.



**Примечание.**

*Щетки на коллекторе установлены так, чтобы они переходили с одной пластины на другую в тот момент, когда ЭДС, индуцируемая в витке, была равна нулю.*

В этом случае при вращении якоря в витке индуцируется переменная ЭДС, изменяющаяся синусоидально при равномерном распределении магнитного поля. Но каждая из щеток соприкасается с той коллекторной пластиной и, соответственно, с тем из проводников, который в данный момент находится под полюсом определенной полярности.

Следовательно, ЭДС на щетках знака не меняет, и ток по внешнему участку замкнутой электрической цепи проходит в одном направлении от одной щетки через сопротивление  $R$  к другой щетке. Однако, несмотря на неизменность направления ЭДС во внешней цепи, величина ее меняется во времени, т. е. получена не постоянная, а пульсирующая ЭДС. Ток во внешней цепи будет также пульсирующим.

Если поместить на якорь два витка под углом  $90^\circ$  один к другому и концы этих витков соединить с четырьмя коллекторными пластинами, то пульсация ЭДС и тока во внешней цепи значительно уменьшится. При увеличении числа коллекторных пластин пульсация быстро

уменьшается и при большом числе коллекторных пластин ЭДС и ток практически постоянны.

На рис. 9.2 показан общий вид машины постоянного тока. Неподвижная часть является индуктирующей, т. е. создающей магнитное поле, а вращающаяся часть — индуктируемой (якорем).

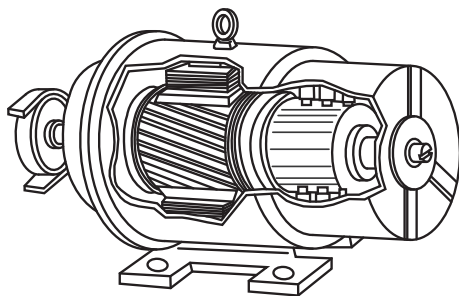


Рис. 9.2. Генератор постоянного тока: общий вид

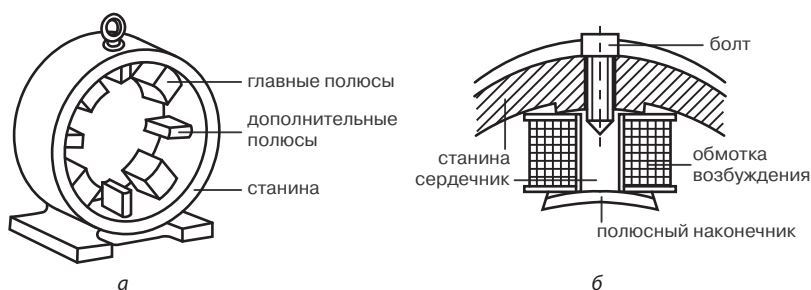


Рис. 9.3. Устройство статора машины постоянного тока:  
а — схема статора; б — схема главного полюса

Неподвижная часть машины (рис. 9.3, а) состоит из главных полюсов, дополнительных полюсов и станины. Главный полюс (рис. 9.3, б) представляет собой электромагнит, создающий магнитный поток.

Он состоит из сердечника, обмотки возбуждения и полюсного наконечника. Полюсы крепятся на станине с помощью болта.

**Сердечник полюса** отливается из стали и имеет поперечное сечение овальной формы. На сердечнике полюса помещена катушка обмотки возбуждения, намотанная из изолированного медного провода. Катушки всех полюсов соединяются последовательно, образуя обмотку возбуждения.

Ток, проходящий по обмотке возбуждения, создает магнитный поток. Полюсный наконечник удерживает обмотку возбуждения на полюсе и обеспечивает равномерное распределение магнитного поля под полюсом.

**Полюсному наконечнику** придают такую форму, при которой воздушный зазор между полюсами и якорем одинаков по всей длине полюсной дуги.

**Добавочные полюсы** имеют также сердечник и обмотку. Добавочные полюсы расположены между главными полюсами, и число их может быть либо равным числу главных полюсов, либо вдвое меньшим. Добавочные полюсы устанавливают в машинах больших мощностей; они служат для устранения искрения под щетками.

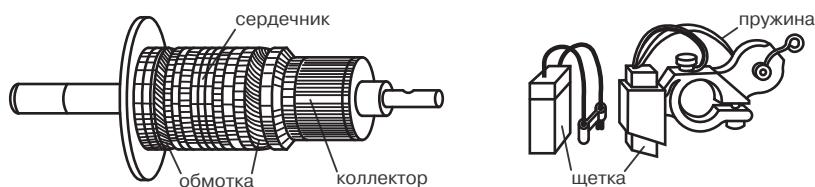


**Примечание.**

В машинах малых мощностей добавочных полюсов обычно нет.

**Станину** отливают из стали; она является остовом машины. На станине крепят главные и добавочные полюсы, а также на торцовых





**Рис. 9.4.** Якорь машины постоянного тока:  
а — общий вид; б — щетка и щеткодержатель

сторонах ее — боковые щиты с подшипниками, удерживающими вал машины.

**Вращающаяся часть машины (якорь)** состоит из сердечника, обмотки и коллектора (рис. 9.4, а). Сердечник якоря представляет собой цилиндр, собранный из листов электротехнической стали. Листы изолируются друг от друга лаком или бумагой для уменьшения потерь на вихревые токи. Стальные листы штампуют на станках по шаблону; они имеют пазы, в которых укладываются проводники обмотки якоря.

В теле якоря делают воздушные каналы для охлаждения обмотки и его сердечника. Обмотка тщательно изолируется от сердечника и закрепляется в пазах деревянными клиньями.

**Лобовые соединения** укрепляются стальными бандажами. Все секции обмотки, помещенные на якоре, включаются между собой последовательно, образуя замкнутую цепь, и присоединяются к коллекторным пластинам.

Коллектор представляет собой цилиндр, состоящий из отдельных пластин. Коллекторные пластины изготовляют из твердотянутой меди и изолируют между собой и от корпуса прокладками из миканита.

Для крепления на втулке коллекторным пластинам придают форму «ласточкина хвоста», который зажимается между выступом на втулке и шайбой, имеющими форму, соответствующую форме пластины. Шайба крепится к втулке болтами.



**Примечание.**

*Коллектор является наиболее сложной в конструктивном отношении и наиболее ответственной в работе частью машины. Поверхность коллектора должна быть строго цилиндрической во избежание биения и искрения щеток.*

Для соединения обмотки якоря с внешней цепью на коллекторе помещают неподвижные щетки, которые могут быть графитными,

угольно-графитными или бронзо-графитными. В машинах высокого напряжения применяют графитные щетки, имеющие большое переходное сопротивление между щеткой и коллектором, в машинах низкого напряжения — бронзо-графитные щетки.

Щетки помещают в особых щеткодержателях (рис. 9.4, б). Щетка, помещенная в обойме щеткодержателя, прижимается пружиной к коллектору.

На щеткодержателе может находиться несколько щеток, включенных параллельно. Щеткодержатели помещаются на щеточных болтах-пальцах, которые, в свою очередь, закреплены на траверсе.

Щеточные пальцы изолируются от траверсы изоляционными шайбами и втулками. Число щеткодержателей обычно равно числу полюсов.

Траверса устанавливается на подшипниковом щите в машинах малой и средней мощности или прикрепляется к станине в большой мощности. Траверсу можно поворачивать и этим изменять положение щеток относительно полюсов. Обычно траверса находится в таком положении, при котором расположение щеток в пространстве совпадает с расположением главных полюсов.

## 9.2. Обмотки якорей и ЭДС машины постоянного тока

Обмотки якорей машины постоянного тока изготовляют из изолированных медных проводов, а в машинах больших мощностей — из шин прямоугольного поперечного сечения. Обмотки выполняются замкнутыми.

При изготовлении обмотки из шин прямоугольного поперечного сечения (стержней) каждая секция может состоять из двух активных проводов (одновитковая секция). Из изолированного медного провода секции обмоток изготовляют в виде катушек с определенным числом витков (многовитковые секции).

В машинах постоянного тока наиболее широкое применение находят двухслойные обмотки, у которых в пазах якоря активные части секций размещаются в два слоя.

Каждая секция обмотки состоит из двух активных сторон, отстоящих друг от друга на расстоянии, близком к полюсному делению  $\tau$ , т. е. расстоянию между осями соседних разноименных полюсов.

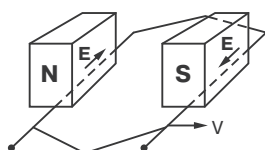


Рис. 9.5. Секция

При таком расстоянии между активными проводниками (шаге обмотки) ЭДС, индуцированные в этих проводниках, будут направлены в одну сторону, а ЭДС секции будет иметь наибольшее значение, так как ЭДС ее активных сторон складываются (рис. 9.5).

Одна активная часть секции находится в верхнем слое паза, другая — в нижнем. При изображении развернутых схем обмоток активные стороны, лежащие в верхнем слое паза, изображаются сплошной линией, а стороны нижнего слоя — прерывистой. Концы секции соединяются как с другими секциями обмотки, так и с коллекторными пластинами.



### Примечание.

Секции, образующие обмотки, соединяются между собой так, чтобы индуцированные в них ЭДС были направлены согласно, т. е. в одну сторону.

Для этого начальные (конечные) проводники последовательно соединенных секций должны находиться в любой момент под полюсами одинаковой полярности.

В зависимости от порядка соединения секций друг с другом обмотки могут быть:

- ♦ параллельными (петлевыми);
- ♦ последовательными (волновыми).

На рис. 9.6 показана (толстой синей линией) одновитковая (а) и многовитковая (б) секции параллельной обмотки, состоящие из активной части верхнего слоя паза  $1$  и нижнего слоя паза  $1 + y_1$ .

В этих обмотках последовательно соединяются между собой секции начальные (конечные), активные стороны которых находятся под одним полюсом в расположенных рядом пазах.

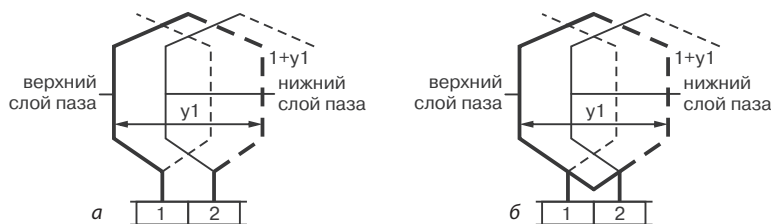


Рис. 9.6. Секция простой параллельной обмотки: (а) одновитковой, (б) многовитковой

Таким образом, концы секции параллельной обмотки присоединяются к двум соседним коллекторным пластинам (1' и 2'). Причем в многовитковых секциях к пластине 1' подключается начало первого витка, а к пластине 2' — конец последнего витка, соединяемый с началом следующей секции (рис. 9.7).

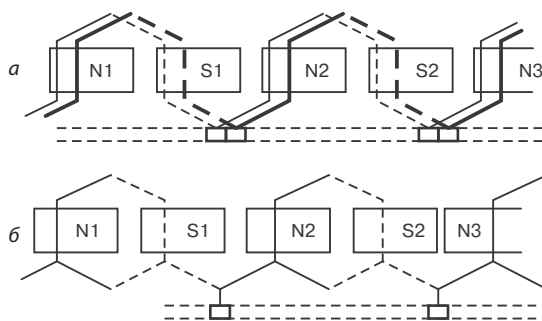


Рис. 9.7. Развернутая схема двух секций простой последовательной обмотки: одновитковой (а); многовитковой (б)

Любая коллекторная пластина (например, 1') соединяется с двумя активными проводами, в каждом из которых проходит ток одной параллельной ветви обмотки  $i_a$ . Так что между двумя щетками различной полярности обмотка образует две параллельные ветви.

При параллельных обмотках число щеток должно быть всегда равно числу полюсов  $2_p$  и, следовательно, число параллельных ветвей  $2_A$  в этих обмотках равно числу полюсов, т. е.  $2_A = 2_p$  ( $a = p$ ).

При большом числе полюсов параллельная обмотка образует много параллельных ветвей, что дает возможность понизить ток в одной ветви и уменьшает поперечное сечение провода обмотки.

В последовательных обмотках начальные (конечные) активные провода секций находятся под различными полюсами одинаковой полярности.

Активные стороны первой секции находятся под полюсами  $N_1$  и  $S_1$ . Активные стороны второй секции, последовательно соединенной с первой, находятся под полюсами  $N_2$  и  $S_2$ , третьей секции — под полюсами  $N_3$  и  $S_3$  и т. д.

После включения всех секций по окружности якоря соединяется верхний проводник пары  $n - 1$ , лежащей рядом (обычно слева) с проводником пары  $n$ , от которого начали обход обмотки.

Последовательно с верхним проводником пары  $n - 1$  включаем проводники, лежащие под полюсами  $S_1$ ,  $N_2$ ,  $S_2$  и т. д., по окружности якоря, и заканчиваем проводником, лежащим рядом с проводником  $n - 1$ .

Затем вновь соединяем пары проводников, находящиеся под различными полюсами по окружности якоря и т. д., пока все проводники не окажутся включенными в замкнутую цепь.

**Примечание.**

*Вне зависимости от числа полюсов простая последовательная обмотка образует две параллельные ветви, т. е.  $2A = 2$ .*

Поэтому при любом числе полюсов машина может иметь только две щетки, если обмотка якоря последовательная, причем эти щетки должны помещаться на расстоянии  $1/2_p$  части окружности коллектора.

Например, при  $p = 2$  расстояние между щетками должно быть равно четверти окружности коллектора. Это дает возможность делать доступной для осмотра не всю окружность коллектора, а только ее часть.

Наличие только двух параллельных ветвей свидетельствует о том, что в каждой ветви последовательно соединяется большое число активных проводов и ЭДС машины может иметь большое значение. Поэтому последовательные обмотки находят применение для машин высокого напряжения.

В проводнике, перемещающемся в магнитном поле в направлении, перпендикулярном направлению магнитных линий этого поля создается ЭДС, равная

$$e = Blv,$$

где  $B$  — среднее значение магнитной индукции, Т;

$l$  — длина проводника, м;

$v$  — скорость перемещения проводника, м/с.

На якоре машины укладывается большое число активных ликов, которое обозначим буквой  $N$ . В каждой параллельной ветви обмотки будет последовательно включено  $N/2a$  активных проводника.

Таким образом, ЭДС машины  $E = N/2ae = N/2aBlv$ .

Скорость перемещения проводников в магнитном поле  $v = 2\pi r (n/60)$ , где  $2p$  — число полюсов машины;  $\tau$  — полюсное деление; т. е. расстояние между осями разноименных полюсов;  $n$  — частота вращения якоря машины в минуту.

Имея в виду, что произведение среднего значения магнитной индукции  $B$  на осевую длину полюса  $l$  и на полюсное деление  $\tau$  представляет собой магнитный поток одного полюса

$$\Phi = Bl\tau.$$

Получим для ЭДС машины следующее выражение:

$$E = ((pN)/(60 A)n\Phi.$$

Для каждой машины величины  $p$ ,  $N$  и  $a$  постоянны, так что отношение  $(pN)/(60a)$  представляет собой величину, постоянную для данной машины.

Следовательно, ЭДС машины постоянного тока определяется следующим выражением:

$$E = Cn\Phi.$$

Т. е. ЭДС машины постоянного тока равна произведению постоянной конструктивной величины  $C$  на частоту вращения якоря в минуту  $n$  и магнитный поток полюсов  $\Phi$ .

Это выражение показывает, что для изменения ЭДС (или напряжения) машины необходимо изменить либо частоту вращения якоря, либо магнитный поток полюсов.

Так как изменение частоты вращения двигателя, приводящего в движение генератор, связано со значительными сложностями, то на практике регулировку ЭДС и напряжения производят изменением магнитного потока, который зависит от тока в обмотке возбуждения. В цепь обмотки возбуждения включают реостат для изменения тока возбуждения.

### 9.3. Магнитное поле машины при нагрузке постоянного тока

#### Магнитное поле при нагрузке

При холостом ходе машины тока в якоре нет, и магнитное поле создается намагничивающей силой полюсов. Оно симметрично относительно оси полюсов и распределяется равномерно в воздушном зазоре (рис. 9.8, а).

Предположим, что щетки установлены на геометрической нейтральной, т. е. на линии, проходящей через центр якоря и перпендикулярной оси полюсов.

При нагрузке машины в обмотке якоря протекает ток, который создает свое магнитное поле, которое, воздействуя на магнитное поле полюсов, изменяет и искажает его. Т. е. по магнитной цепи замкнется результирующий магнитный поток  $\Phi_r$  под действием намагничивающих сил полюсов и якоря.

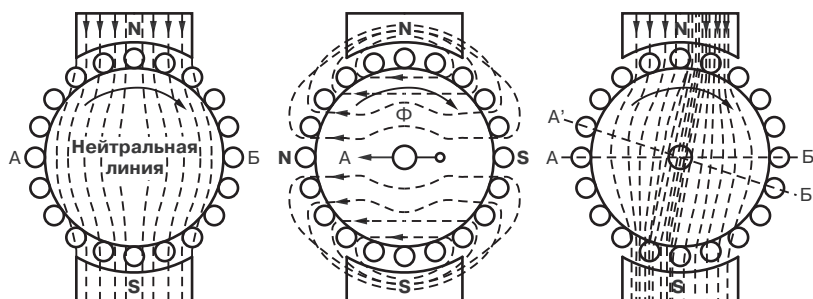


Рис. 9.8. Магнитное поле машины постоянного тока:

а — магнитное поле полюсов; б — магнитное поле якоря;  
в — результирующее магнитное поле при нагрузке

Результирующий магнитный поток  $\Phi_p$  не равен потоку полюсов  $\Phi_m$  при холостом ходе.



#### Определение.

Воздействие поля, созданного током в якоре при нагрузке машины, на магнитное поле полюсов называется **реакцией якоря**.

Пропустим по проводникам обмотки якоря невозбужденной машины ток от постороннего источника. Такой ток протекал бы при нагрузке машины, то будет создано магнитное поле якоря (рис. 9.8, б). Это поле якоря замкнется в направлении, перпендикулярном оси полюсов и называется **поперечным полем реакции якоря**.

**Магнитодвижущая сила якоря направлена:**

- ♦ под одним краем полюса (под набегающим для генератора и под сбегающим для двигателя) встречно магнитодвижущей силе полюсов;
- ♦ под другим краем полюса (под сбегающим для генератора и под набегающим для двигателя) согласно магнитодвижущей силе полюсов.



#### Вывод.

Следовательно, под одним краем полюса происходит уменьшение, а под другим — увеличение магнитной индукции.

Таким образом, при нагрузке машины результирующее магнитное поле будет несимметрично относительно оси полюсов (рис. 9.8, в). Т. е. поперечное поле реакции якоря перераспределяет магнитное поле полюсов, ослабляя его под одним краем и усиливая под другим.

Поле реакции якоря также смещает физическую нейтраль, т. е. линию, проходящую через центр якоря и перпендикулярную МДС результирующего магнитного поля.

### Коммутация тока



#### Определение.

*Под коммутацией понимают переключение секции из одной ветви обмотки в другую и происходящее при этом изменение направления тока в ней.*

При вращении якоря машины коллекторные пластины поочередно соприкасаются со щетками, так что в определенные промежутки времени секция или несколько секций замыкаются щеткой. Поскольку переходное сопротивление между щеткой и коллекторной пластиной сравнительно мало, то замыкание секций близко к их короткому замыканию.

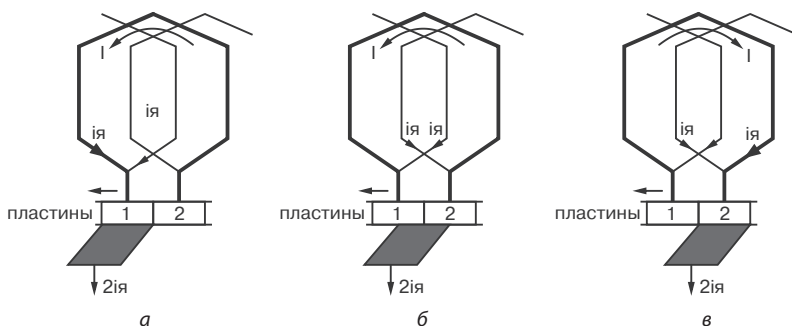
На рис. 9.9, а показана коммутируемая секция простой параллельной обмотки. В этой секции протекает ток одной параллельной ветви:

$$i_{\text{я}} = I/2a,$$

где  $I$  — ток нагрузки;

$2a$  — число параллельных ветвей обмотки.

При вращении якоря его обмотка и коллектор перемещаются относительно неподвижной щетки справа налево. В некоторый момент, соответствующий началу коммутации, щетка соприкасается с кол-



**Рис. 9.9.** Коммутируемая секция обмотки:

а — до начала коммутации; б — при коммутации; в — по окончании коммутации



латорной пластиной 1, соединенной с двумя проводами обмотки, в каждом из которых проходит ток одной параллельной ветви.

Таким образом, через коллекторную пластину и щетку проходит ток, равный сумме токов двух параллельных ветвей  $2i_a$ .

В выделенной нами секции ток равен току одной параллельной ветви и в данный момент направлен против часовой стрелки.

В дальнейшем при вращении якоря щетка будет соприкасаться с коллекторными пластинами 1 и 2, замыкая рассматриваемую нами секцию (рис. 9.9, б).

В определенный момент щетка полностью перейдет на коллекторную пластину 2. Ток в этой секции изменит направление на обратное (рис. 9.9, в). Т. е. секция переключится из одной параллельной ветви в другую.

Время переключения секции, называемое **периодом коммутации**, мало, и за это время в секции ток изменяется от  $+i_a$  до  $-i_a$ .

При изменении тока в секции создается ЭДС самоиндукции, которая может достигать сравнительно больших значений.

Кроме того, поскольку процесс коммутации происходит одновременно в нескольких секциях под всеми щетками, то в каждой секции создаются ЭДС взаимоиндукции.

ЭДС самоиндукции и взаимоиндукции, называемые **реактивными ЭДС**, препятствуя изменениям тока, вызывают неравномерное распределение плотности тока под щеткой. Это является причиной образования искрения, которое особенно интенсивно в момент размыкания щеткой секции обмотки.

Чрезмерная плотность тока при наличии разности потенциалов между щеткой и коллектором приводит к образованию дугового разряда. Он ионизирует тончайшие слои воздуха, находящегося между щеткой и коллектором и способствует развитию дуги.



#### **Внимание.**

*Дуга может перейти к щетке другой полярности, образовав круговой огонь на коллекторе, и это приведет к повреждению последнего.*

**Искрение щеток** может быть также вызвано рядом других причин:

- ♦ неровностью поверхности коллектора;
- ♦ биением щеток;
- ♦ загрязненностью поверхности коллектора;
- ♦ наличием влаги на ней и т. д.

**Внимание.**

Даже незначительное искрение щеток нежелательно, так как увеличивается износ щеток и коллектора, а также повышается нагрев последнего вследствие увеличения переходного сопротивления между щеткой и коллектором.

Наиболее эффективным способом улучшения коммутации является **компенсация реактивных ЭДС**. Для этого в зоне коммутации, в которой находятся активные стороны коммутируемых секций, необходимо создать такое внешнее магнитное поле, при котором индуцируемая в секциях ЭДС вращения  $e_v$  будет равна и противоположна реактивной ЭДС  $e_r$ , т. е.  $e_v = -e_r$ .

Для создания такого внешнего магнитного поля устанавливают дополнительные полюсы  $N_K$  и  $S_K$ , размещая их между главными полюсами.

Если якорь (рис. 9.10) вращается каким-либо двигателем в направлении часовой стрелки, то в обмотке якоря индуцируется ЭДС и при нагрузке проходит ток.

Направления ЭДС и тока в проводниках обмотки совпадают. На схеме выделены проводники 1 и 2 коммутируемой секции.

Реактивная ЭДС  $e_r$ , препятствуя изменениям тока в коммутируемой секции, будет направлена в проводниках 1 и 2 встречно изменениям тока.

Для компенсации реактивной ЭДС в проводниках 1 и 2 нужно создать ЭДС вращения  $e_v = -e_r$ , для чего и установлены дополнительные полюсы  $N_K$  и  $S_K$ .

**Правило.**

Таким образом, полярность дополнительного полюса в генераторе должна соответствовать полярности следующего за ним в направлении вращения якоря главного полюса.

В двигателе полярность дополнительного полюса должна соответствовать полярности предыдущего по направлению вращения якоря главного полюса.

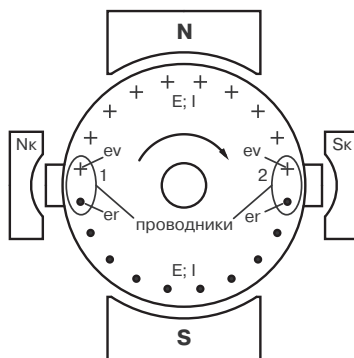


Рис. 9.10. Полярность дополнительных полюсов в генераторах постоянного тока

Обмотку возбуждения дополнительных полюсов соединяют последовательно с обмоткой якоря для того, чтобы реактивная ЭДС была компенсирована при любой нагрузке машины.

Для этой же цели магнитная цепь дополнительных полюсов ненасыщенна, т. е. между сердечником якоря и дополнительным полюсом создан сравнительно большой воздушный промежуток. Так как реактивная ЭДС пропорциональна току в якоре, то она компенсируется при любой нагрузке машины в том случае, если ЭДС вращения также пропорциональна току нагрузки.

Поэтому магнитное поле в зоне коммутации должно изменяться пропорционально току якоря.

## 9.4. Способы возбуждения генераторов.

### Характеристики генераторов постоянного тока

#### Работа машины постоянного тока в режиме генератора

Якорь генератора приводится во вращение каким-либо двигателем, развивающим вращающий момент  $M_1$ . При перемещении проводников обмотки якоря в магнитном поле полюсов в них индуцируется ЭДС, направление которой определяется правилом правой руки (рис. 9.11). Если якорь вращается с частотой в минуту  $n$ , то в его обмотке индуцируется ЭДС  $E = Cn\Phi$ .

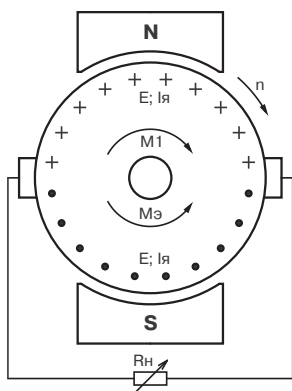


Рис. 9.11. Схема работы генератора постоянного тока

Если обмотку якоря через щетки замкнуть на какой-либо приемник энергии  $R_n$  (сопротивление нагрузки), то через этот приемник и обмотку якоря будет проходить ток  $I$ , направление которого в обмотке якоря совпадает с направлением ЭДС.

В результате взаимодействия этого тока с магнитным полем полюсов создается электромагнитный момент  $M_э$ , направление которого определяется правилом левой руки.

Таким образом, развиваемый машиной электромагнитный момент является тормозным, направленным встречно направле-

нию вращения якоря машины. Так что для вращения последнего первичный двигатель должен развивать вращающий момент  $M_1$  достаточный для преодоления электромагнитного тормозного момента, следовательно, машина потребляет механическую энергию.

В случае равновесия моментов, т. е.  $M_1 = M_3$ , якорь машины вращается с неизменной частотой.

При нарушении равновесия моментов частота вращения якоря начнет изменяться. Если почему-либо момент первичного двигателя уменьшится, т. е. станет меньше электромагнитного момента генератора ( $M_1 < M_3$ ), вращение якоря машины начнет замедляться. При этом будет уменьшаться как ЭДС, так и ток в обмотке якоря, что понизит тормозной электромагнитный момент генератора.

В случае увеличения момента первичного двигателя ( $M_1 > M_3$ ) частота вращения якоря, а также ЭДС и ток в его обмотке будут возрастать, что увеличит тормозной электромагнитный момент.

При нарушении равновесия моментов частота вращения якоря, ЭДС и ток в его обмотке претерпевают изменения до восстановления равновесия моментов, т. е. пока электромагнитный момент генератора не станет равным вращающему моменту первичного двигателя.

Таким образом, любое изменение момента первичного двигателя, т. е. потребляемой генератором мощности, вызывает соответствующее изменение как электромагнитного момента генератора, так и вырабатываемой им мощности.

Также при изменениях нагрузки генератора потребуются соответствующее изменение момента первичного двигателя для поддержания постоянства частоты вращения якоря генератора.

Ток обмотки якоря  $I$  при нагрузке генератора встречает на своем пути сопротивление внешней нагрузки  $R_n$ , сопротивление обмотки якоря  $R_{об}$  и сопротивление переходных контактов между щетками и коллектором  $R_{щ}$ .

Обозначив через  $R_я$  внутреннее сопротивление машины, представляющее собой сумму сопротивлений обмотки якоря и щеточных контактов ( $R_{об} + R_{щ}$ ), для тока в якоре можем записать следующее выражение:  $I = E / (R_я + R_n)$ .

Сопротивление  $R_{щ}$  непостоянно и зависит от многих факторов: величины и направления тока, состояния коллектора, силы нажатия щеток на коллектор, частоты вращения.

Падение напряжения в щеточных контактах остается примерно неизменным при изменениях нагрузки (принимается равным 2 В на

пару угольных и графитных щеток). Поэтому внутреннее сопротивление машины  $R_{\text{я}}$  также непостоянно при изменении нагрузки генератора.

Так как  $IR_{\text{я}} = U$ , где  $U$  — напряжение на зажимах генератора при нагрузке, то получим следующее уравнение равновесия ЭДС для генератора:  $U = E - IR_{\text{я}}$ .

Из уравнения равновесия ЭДС легко получить уравнение мощностей, т. е.

$$UI = EI - IR_{\text{я}}^2 \text{ или } P_2 = P_{\text{э}} - I^2 R_{\text{я}},$$

где  $P_2$  — полезная мощность генератора, отдаваемая потребителю электрической энергии;

$P_{\text{э}}$  — внутренняя или электромагнитная мощность генератора, преобразованная им в электрическую;

$I^2 R_{\text{я}} = P_{\text{об}}$  — потери мощности в обмотке якоря и щеточных контактах.

При холостом ходе генератора электромагнитная мощность равна нулю ( $P_{\text{э}} = 0$ ), но для вращения якоря машины первичный двигатель должен затратить некоторую мощность  $P_0$ , расходуемую на покрытие потерь холостого хода.

Мощность  $P_0$  складывается из механических потерь на трение в подшипниках и трение о воздух вращающихся частей машины  $P_{\text{мех}}$  и из потерь в стали на гистерезис и вихревые токи  $P_{\text{ст}}$ .

В генераторах с самовозбуждением мощность  $P_0$  включает также мощность, затраченную на создание магнитного потока, т. е. на возбуждение машины.

При нагрузке генератора первичный двигатель затрачивает мощность

$$P_1 = P_{\text{э}} + P_0.$$

Электромагнитный момент машины  $M_{\text{э}} = P_{\text{э}}/\omega$ , где  $\omega = 2\pi n/60$  рад/с — угловая скорость якоря.

Так как  $P_{\text{э}} = EI$  и  $E = (pN/60 A) \text{ нФ}$ , то электромагнитный момент машины определится следующим выражением:  $M_{\text{э}} = (pN/2\pi a) I\Phi$ .

Величины  $a$ ,  $p$  и  $N$  постоянны для данной машины, поэтому выражение

$$pN/2\pi a = K$$

представляет собой некоторый постоянный для данной машины коэффициент.

При этом электромагнитный момент равен:  $M_э = KI\Phi$ , т. е. электромагнитный момент пропорционален произведению тока в якоре на магнитный поток полюсов.

### Способы возбуждения генераторов постоянного тока

Генераторы постоянного тока могут быть выполнены с магнитным и электромагнитным возбуждением.

Для создания магнитного потока используют:

- ♦ в генераторах с магнитным возбуждением — постоянные магниты;
- ♦ в генераторах с электромагнитным возбуждением — электромагниты.

Постоянные магниты применяют лишь в машинах очень малых мощностей. Таким образом, электромагнитное возбуждение является наиболее широко используемым способом для создания магнитного потока.

При этом способе возбуждения магнитный поток создается током, проходящим по обмотке возбуждения.

В зависимости от способа питания обмотки возбуждения генераторы постоянного тока могут быть двух типов:

- ♦ с независимым возбуждением;
- ♦ с самовозбуждением.

При независимом возбуждении (рис. 9.12, а) обмотка возбуждения включается в сеть вспомогательного источника энергии постоянного тока. Для регулирования тока возбуждения  $I_v$  в цепи обмотки включено сопротивление  $R_p$ . При таком возбуждении ток  $I_v$  не зависит от тока в якоре  $I$ .

Недостатком генераторов независимого возбуждения является потребность в дополнительном источнике энергии. Поэтому генераторы независимого возбуждения находят очень ограниченное применение только в машинах высоких напряжений, у которых питание обмотки возбуждения от цепи якоря недопустимо по конструктивным соображениям.

Генераторы с самовозбуждением в зависимости от включения обмотки возбуждения могут быть параллельного (рис. 9.12, б), последовательного (рис. 9.12, в) и смешанного (рис. 9.12, г) возбуждения.

У генераторов **параллельного возбуждения** ток мал (несколько процентов номинального тока якоря), и обмотка возбуждения имеет большое число витков.

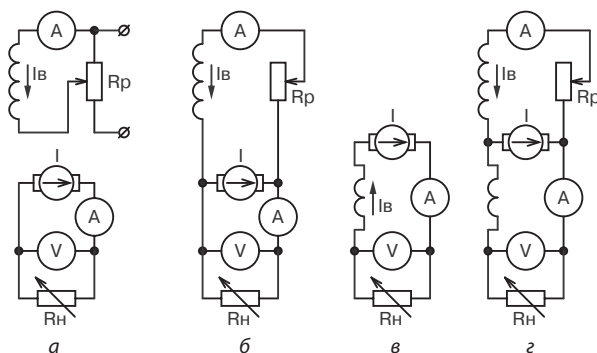


Рис. 9.12. Схемы возбуждения генераторов постоянного тока: независимого (а); параллельного (б); последовательного (в); смешанного (г)

При **последовательном возбуждении** ток возбуждения равен току якоря и обмотка возбуждения имеет малое число витков.

При **смешанном возбуждении** на полюсах генератора помещаются две обмотки возбуждения — параллельная и последовательная.

**Процесс самовозбуждения генераторов** постоянного тока протекает одинаково при любой схеме возбуждения. Рассмотрим, например, процесс самовозбуждения в генераторах параллельного возбуждения, получивших наиболее широкое применение.

Какой-либо первичный двигатель вращает якорь генератора, магнитная цепь (ядро и сердечники полюсов) которого имеет небольшой остаточный магнитный поток  $\Phi_0$ . Этим магнитным потоком в обмотке вращающегося якоря индуцируется ЭДС  $E_0$ , составляющая несколько процентов номинального напряжения машины.

Под действием ЭДС  $E_0$  в замкнутой цепи, состоящей из якоря и обмотки возбуждения, проходит ток  $I_b$ .

Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения  $\omega I_b$  ( $\omega$  — число витков) направлена согласно с потоком остаточного магнетизма, увеличивая магнитный поток машины  $\Phi$ , что вызывает повышение как ЭДС в обмотке якоря  $E$ , так и тока в обмотке возбуждения  $I_b$ . Увеличение последнего приводит к дальнейшему возрастанию  $\Phi$ , что, в свою очередь, увеличивает  $E$  и  $I_b$ .

Из-за насыщения стали магнитной цепи машины самовозбуждение происходит не беспредельно, а до какого-то определенного напряжения, зависящего от частоты вращения якоря машины и сопротивления в цепи обмотки возбуждения.

При насыщении стали магнитной цепи увеличение магнитного потока замедляется, и процесс самовозбуждения заканчивается.

Увеличение сопротивления в цепи обмотки возбуждения уменьшает как ток в ней, так и магнитный поток, возбуждаемый этим током. Поэтому уменьшается ЭДС и напряжение, до которого возбуждается генератор.

Напряжение так же, как и ЭДС, прямо пропорционально частоте, вследствие чего с изменением частоты вращения изменяется и напряжение, до которого возбуждается генератор.

### Характеристики генераторов постоянного тока

Характеристики генератора определяют его рабочие свойства и представляют зависимость между основными величинами, которыми являются ЭДС в обмотке якоря  $E$ , напряжение на его зажимах  $U$ , ток в якоре  $I$ , ток возбуждения  $I_v$  и частота вращения якоря  $n$ .

Характеристики представляют собой зависимости между двумя из указанных основных величин при неизменных остальных. Эти зависимости имеют различный вид для генераторов разных типов.

Снятие всех характеристик машины производится при постоянной частоте вращения якоря, так как при изменении частоты значительно изменяются все характеристики генератора.

Характеристика холостого хода генератора представляет собой зависимость между ЭДС в якоре и током возбуждения, снятую при отсутствии нагрузки и постоянной частоте вращения.

Для генераторов независимого возбуждения при отсутствии нагрузки (холостой ход) ток в якоре равен нулю. ЭДС, индуцированная в обмотке якоря, равна

$$E = Cn\Phi.$$

Поэтому при постоянной частоте вращения ЭДС окажется прямо пропорциональной магнитному потоку.



#### Примечание.

*Можно сказать, что в измененном масштабе характеристика холостого хода представляет магнитную характеристику машины.*

При  $I_v = 0$  магнитная цепь машины (главным образом ярмо) имеет некоторый остаточный магнитный поток  $\Phi_0$ , который индуцирует в обмотке якоря ЭДС  $E$  (рис. 9.13, а). Эта ЭДС составляет несколько процентов (2—5%) номинального напряжения машины.



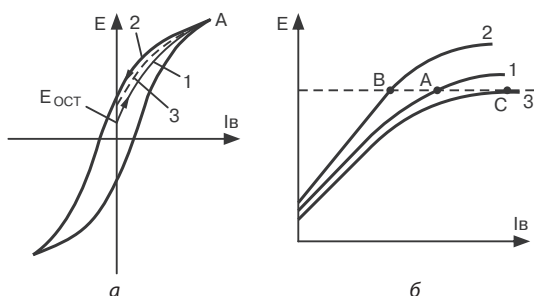


Рис. 9.13. Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения:  
а — при перемагничивании стали;  
б — при изменении частоты вращения якоря

С увеличением тока в обмотке возбуждения возрастают как магнитный поток, так и ЭДС, индуцированная в обмотке якоря. Таким образом, при постоянном постепенном увеличении  $I_b$  возрастает и ЭДС (кривая 1).

Если после снятия восходящей ветви от точки А начать постепенно понижать ток возбуждения  $I_b$ , то ЭДС

также начнет уменьшаться, но за счет гистерезиса нисходящая ветвь (кривая 2) пойдет несколько выше восходящей ветви этой характеристики.

Изменяя  $I_b$  не только по величине, но и по направлению, можно снять весь цикл перемагничивания стали машины.

Практически восходящая и нисходящая ветви магнитной характеристики имеют крайне незначительное расхождение, и за основную характеристику принимается средняя зависимость (кривая 3).

На (рис. 9.13, б) показаны характеристики холостого хода, снятые при различной частоте вращения якоря генератора.

Вращению якоря машины с номинальной частотой  $n_n$ , указанной в паспорте генератора, соответствует кривая 1. Для всех машин нормального типа точка номинального напряжения (точка А) находится на перегибе магнитной характеристики.

Выбор точки номинального напряжения на линейном участке магнитной характеристики приводит к резким колебаниям напряжения на зажимах генератора при нагрузке, так как незначительные колебания магнитодвижущей силы вызывают резкое изменение ЭДС.

Выбор этой точки на пологом участке магнитной характеристики приводит к ограничению регулирования напряжения на зажимах генератора, так как для изменения ЭДС требуются очень большие изменения тока возбуждения.

При частоте вращения, отличной от номинальной частоты вращения якоря генератора, меняется характеристика холостого хода, так как ЭДС пропорциональна частоте. При  $n' > n_n$  характеристика холостого хода расположится выше (кривая 2), а при  $n' < n_n$  — ниже (кривая 3), чем при номинальной частоте вращения.

Следовательно, при изменении частоты вращения якоря точка номинального напряжения окажется либо на линейном (точка В), либо на пологом (точка С) участке магнитной характеристики. Это вызывает изменение всех характеристик генератора. Поэтому первичный двигатель для вращения якоря генератора надо выбирать так, чтобы его частота вращения была близкой к номинальной частоте генератора.

Для генераторов параллельного возбуждения при холостом ходе ток в якоре равен току возбуждения ( $I = I_v$ ). Так как этот ток составляет малую величину (несколько процентов номинального тока генератора), то напряжение на зажимах машины при холостом ходе будет примерно равным ЭДС. Характеристика холостого хода этого генератора практически совпадет с характеристикой генератора независимого возбуждения.

Однако весь цикл перемагничивания в генераторах параллельного возбуждения снять нельзя. Ведь при изменении направления тока в обмотке возбуждения магнитный поток ее будет направлен встречно потоку остаточного магнетизма, и самовозбуждение генератора окажется невозможным.

Для генератора последовательного возбуждения характеристика холостого хода смысла не имеет, так как при холостом ходе в якоре и обмотке возбуждения ток равен нулю, и характеристика может быть снята только по схеме независимого возбуждения.

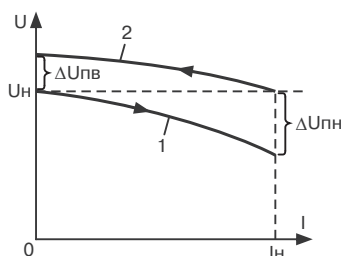
Для этого обмотка возбуждения генератора должна быть включена в сеть какого-либо независимого источника тока.

Для генераторов смешанного возбуждения характеристика холостого хода совпадает с характеристикой генератора параллельного возбуждения.

Внешняя характеристика представляет собой зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки. Эта характеристика соответствует естественным условиям работы машины, т. е. машина нерегулируема (сопротивление цепи возбуждения  $R_v$  постоянно) и снимается при неизменной частоте вращения.

Для генераторов независимого возбуждения при постоянном  $R_v$  неизменен также и ток возбуждения  $I_v$ . Внешние характеристики такого генератора показаны на (рис. 9.14).

Кривая 1 представляет собой внешнюю характеристику на понижение напряжения, соответствующую току обмотки возбуждения, при котором напряжение генератора равно номинальному при холостом ходе.



**Рис. 9.14.** Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения

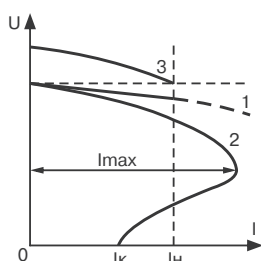
**Характеристике на повышение напряжения** (кривая 2) соответствует такой ток возбуждения, чтобы при номинальной нагрузке генератора напряжение на его зажимах было равно номинальному, после чего нагрузка генератора уменьшается.

С уменьшением нагрузки (тока в якоре) также снижается как падение напряжения в сопротивлении обмотки якоря и щеточных контактах, так и размагничивающее действие реакции якоря, что вызывает повышение напряжения.

При изменении нагрузки от номинальной до 0 напряжение на зажимах генератора увеличивается на величину  $\Delta U_{пв}$ .

За счет насыщения стали повышение напряжения меньше, чем понижение, так как размагничивающее действие реакции якоря будет сказываться тем сильнее, чем меньше степень насыщения стали.

В генераторах параллельного возбуждения при постоянном сопротивлении цепи возбуждения  $R_v$  ток возбуждения не остается постоянным, так как зависит от напряжения на зажимах генератора, которое при изменении нагрузки меняется.



**Рис. 9.15.** Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

С возрастанием нагрузки (тока  $I$  в якоре генератора) увеличивается:

- ♦ и падение напряжения в сопротивлении его обмотки;
- ♦ и размагничивающее действие реакции якоря.

Это вызывает понижение напряжения.

При изменении нагрузки от нуля до номинальной напряжение на зажимах генератора уменьшается на величину  $\Delta U_{пн}$ .

**В генераторах независимого возбуждения** увеличение нагрузки вызывает понижение напряжения под воздействием падения напряжения в сопротивлении машины и реакции якоря (кривая 1 на рис. 9.15).

**В генераторах параллельного возбуждения** при уменьшении напряжения также уменьшается ток возбуждения, что вызывает уменьшение магнитного потока и понижение напряжения.

Следовательно, при увеличении нагрузки напряжение на зажимах генератора этого

типа уменьшается в большей мере (кривая 2 на рис. 9.15), чем в генераторах независимого возбуждения.

Уменьшение внешнего сопротивления нагрузки вызывает увеличение тока до некоторого значения  $I_{\text{макс}}$ , не превышающего номинальный ток более чем в 2—2,5 раза.

При дальнейшем уменьшении внешнего сопротивления ток уменьшается и при коротком замыкании будет значительно меньше номинального.

Понижение сопротивления нагрузки вызывает уменьшение тока возбуждения, так как напряжение генератора понижается. Если ток возбуждения уменьшился настолько, что машина оказалась размагнитченной, то ЭДС понижается в большей степени, чем сопротивление нагрузки, что вызывает уменьшение тока в якоре.

При коротком замыкании генератора параллельного возбуждения ток  $I_v$  равен нулю, и обмотка возбуждения не создает магнитного потока.

Поэтому в обмотке якоря будет ЭДС только от остаточного магнитного потока  $E_0$ , имеющая малое значение, и, следовательно, ток короткого замыкания  $I_k$  будет также мал.

Внешняя характеристика на повышение напряжения у генератора параллельного возбуждения (кривая 3 на рис. 9.15) имеет такой же вид, как у генератора независимого возбуждения.

Для генератора последовательного возбуждения внешняя характеристика показана на (рис. 9.16). В генераторах этого типа ток возбуждения равен току якоря ( $I_v = I$ ), и при холостом ходе ( $I = 0$ ) в обмотке якоря будет создана ЭДС  $E_0$  за счет остаточного магнетизма.

С увеличением нагрузки также возрастет ток в обмотке возбуждения, что вызывает увеличение ЭДС (кривая 1 на рис. 9.16).

Напряжение на зажимах генератора при нагрузке меньше ЭДС вследствие падения напряжения в сопротивлении машины и реакции якоря (кривая 2 на рис. 9.16).

Таким образом, у генераторов последовательного возбуждения напряжение резко меняется с изменением нагрузки, поэтому они не нашли применения.

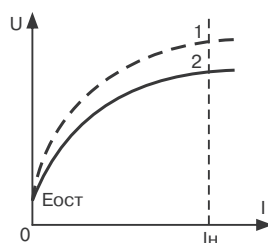
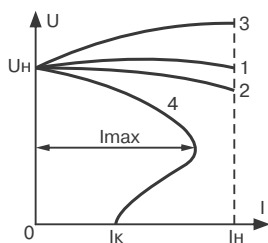


Рис. 9.16. Внешняя характеристика генератора последовательного возбуждения

В генераторах смешанного возбуждения возможно согласное и встречное включение последовательной и параллельной обмоток.

При согласном включении обмоток возбуждения результирующая магнитодвижущая сила, создающая магнитный поток, равна сумме магнитодвижущих сил параллельной и последовательной обмоток, а при встречном включении — разности этих магнитодвижущих сил.



**Рис. 9.17.** Внешняя характеристика генератора смешанного возбуждения

На **рис. 9.17** показаны внешние характеристики генератора смешанного возбуждения. С увеличением нагрузки такого генератора уменьшается напряжение на его зажимах в результате падения напряжения в его сопротивлении и реакции якоря. Однако с увеличением нагрузки возрастает также ток в последовательной обмотке возбуждения.

Поэтому при согласном включении обмоток увеличение нагрузки вызывает увеличение магнитного потока и ЭДС обмотки якоря.

Если ЭДС с повышением нагрузки возрастает на величину, равную понижению напряжения генератора, так как падает напряжение в его сопротивлении и реакции якоря, то напряжение на зажимах генератора будет практически оставаться неизменным при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной (кривая 1 на **рис. 9.17**).

Такой генератор, называемый **нормально возбужденным**, не требует регулировки тока возбуждения при изменениях нагрузки.

При уменьшении числа витков последовательной обмотки ЭДС с возрастанием нагрузки будет увеличиваться в меньшей степени, и не будет компенсировать понижения напряжения. Поэтому напряжение на зажимах генератора будет уменьшаться (кривая 2 на **рис. 9.17**), т. е. генератор недовозбужден.

Если число витков последовательной обмотки возбуждения больше, чем то, которое соответствует нормальному возбуждению машины, то генератор окажется перевозбужденным, и напряжение на его зажимах будет возрастать с увеличением нагрузки (кривая 3 на **рис. 9.17**).

При встречном включении обмоток возбуждения внешняя характеристика подобна внешней характеристике генератора параллельного возбуждения (кривая 4 на **рис. 9.17**), однако токи максимальный  $I_{\text{макс}}$  и короткого замыкания  $I_k$  у генератора смешанного возбуждения будут меньше соответствующих токов генератора параллельного воз-

буждения в результате размагничивающего действия магнитодвижущих сил последовательной обмотки.

Наиболее часто применяют генераторы нормально возбужденные, а также перевозбужденные, позволяющие компенсировать падение напряжения в линии, соединительных проводах и т. д. с тем, чтобы напряжение на нагрузке оставалось постоянным при изменении тока.

**Генераторы со встречным включением** обмоток возбуждения не обеспечивают постоянства напряжения и поэтому **широкого применения не нашли**. Их используют лишь в тех случаях, когда необходимо ограничить токи коротких замыканий (например, при электро-сварке).

Регулировочная характеристика генератора представляет собой зависимость тока возбуждения от тока нагрузки, снимаемая при постоянном напряжении на зажимах генератора.

Регулировочная характеристика генератора показывает, в какой мере следует изменить ток в обмотке возбуждения для того, чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось постоянным при изменении тока нагрузки.

В генераторах независимого и параллельного возбуждения с увеличением тока нагрузки необходимо увеличить ток возбуждения для того, чтобы скомпенсировать падение напряжения на внутреннем сопротивлении машины и размагничивающее действие потока реакции якоря.

В генераторах смешанного возбуждения (нормально возбужденных) напряжение при изменении нагрузки не претерпевает изменений, и, следовательно, необходимость регулирования тока возбуждения отпадает, т. е. регулировочная характеристика в таких генераторах не имеет смысла, так как ток возбуждения постоянен при изменениях тока нагрузки.

## 9.5. Пуск, характеристики, регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока.

### Потери и КПД машин постоянного тока

#### Работа машины постоянного тока в режиме двигателя

При включении двигателя постоянного тока в сеть под действием приложенного напряжения проходит ток как в обмотке якоря, так и в обмотке возбуждения. Ток возбуждения создает магнитный поток полюсов.

В результате взаимодействия тока в проводниках обмотки якоря с магнитным полем полюсов создается вращающий момент, и якорь машины приходит во вращение. Таким образом, электрическая энергия преобразуется в энергию механическую.

Положим, что генератор параллельного возбуждения включен в сеть большой мощности (рис. 9.18). Ток нагрузки генератора определяется следующим выражением:

$$I = (E - U)/R_{\text{я}},$$

где  $I$  — ток в обмотке якоря;

$R_{\text{я}}$  — сопротивление этой обмотки;

$E$  — ЭДС, индуцируемая в этой же обмотке;

$U$  — напряжение сети.

Направление ЭДС и тока в активных проводках якоря показано на схеме (рис. 9.19, а). Машина развивает электромагнитный момент  $M_{\text{э}}$ ,

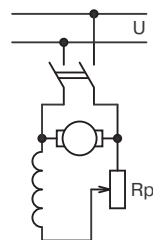


Рис. 9.18. Схема включения генератора параллельного возбуждения в сеть

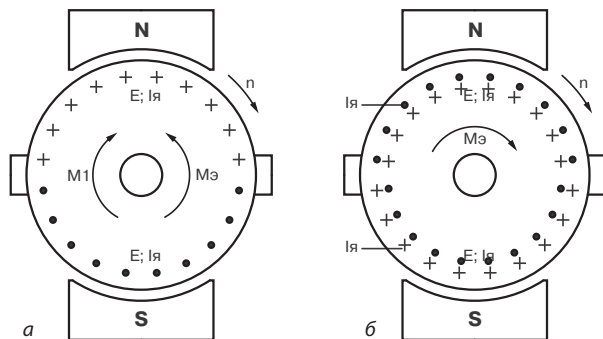


Рис. 9.19. Схема работы машины постоянного тока в режимах: генератора (а); двигателя (б)



являющийся **тормозным**, т. е. потребляет механическую энергию и вырабатывает энергию электрическую.

Если понизить ток возбуждения, то уменьшится как магнитный поток, так и ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря. Это вызовет уменьшение нагрузки генератора.

Изменяя сопротивление регулировочного реостата, можно довести ток возбуждения до такой величины, при которой ЭДС в обмотке якоря будет равна напряжению сети ( $E = U$ ), а ток в якоре равен нулю. Т. е. генератор работает вхолостую.

При токе возбуждения меньшем тока, соответствующего холостой работе генератора, ЭДС обмотки якоря будет меньше напряжения сети, и ток в якоре изменит направление на обратное (рис. 9.19, б).

При изменении направления тока в проводниках обмотки якоря также изменится направление электромагнитного момента  $M_z$ , развиваемого машиной, т. е. момент станет вращающим.



#### **Вывод.**

*Таким образом, машина, потребляя электрическую энергию, вырабатывает энергию механическую, т. е. работает двигателем.*

Если отключить первичный двигатель, то якорь машины будет продолжать вращаться под действием развиваемого электромагнитного момента  $M_z$ .

При вращении якоря в проводниках его обмотки индуцируется ЭДС, направление которой противоположно направлению тока. Поэтому ее называют противо-ЭДС или обратной ЭДС.

Противо-ЭДС играет роль регулятора потребляемой мощности, т. е. потребляемый ток изменяется вследствие изменения противо-ЭДС, равной  $E = Cn\Phi$ .

Вращающий момент, развиваемый двигателем,  $M_z = KI\Phi$ .

Приложенное напряжение уравнивается противо-ЭДС и падением напряжения в сопротивлении обмотки якоря и щеточных контактов. Следовательно,  $U = E + IR_{\text{я}}$ .

Ток в обмотке и частота вращения якоря определяются следующими выражениями:

$$I = (U - E)/R_{\text{я}} \text{ и } n = (U - IR_{\text{я}})/C\Phi.$$

Направление вращения якоря двигателя зависит от полярности полюсов и от направления тока в проводниках обмотки якоря. Таким



образом, для реверсирования двигателя, т. е. для изменения направления вращения якоря, нужно либо изменить полярность полюсов, переключив обмотку возбуждения, либо изменить направление тока в обмотке якоря.

Обмотка возбуждения обладает значительной индуктивностью, и переключение ее нежелательно. Поэтому реверсирование двигателей постоянного тока обычно заключается в переключении обмотки якоря.

### Пуск двигателей постоянного тока

В начальный момент пуска в ход якорь двигателя неподвижен, и противо-ЭДС равна нулю ( $E = 0$ ). При непосредственном включении двигателя в сеть в обмотке якоря будет протекать чрезмерно большой ток  $I_{\text{пуск}} = U/R_{\text{я}}$ . Поэтому непосредственное включение в сеть допускается только для двигателей очень малой мощности, у которых падение напряжения в якоре представляет относительно большую величину и броски тока не столь велики.

В машинах постоянного тока большой мощности падение напряжения в обмотке якоря при полной нагрузке составляет несколько процентов от номинального напряжения, т. е.  $IR_{\text{я}} = (0,02—0,1)U$ .

Следовательно, пусковой ток, в случае включения двигателя в сеть с номинальным напряжением, во много раз превышает номинальный. Для ограничения пускового тока используют **пусковые реостаты**, включаемые последовательно с якорем двигателя при пуске в ход.

Пусковые реостаты представляют собой проволочные сопротивления, рассчитываемые на кратковременный режим работы. Они выполняются ступенчатыми. Это дает возможность изменять ток в якоре двигателя в процессе пуска его в ход.

Схема двигателя **параллельного возбуждения с пусковым реостатом** показана на (рис. 9.20, а).

Пусковой реостат этого двигателя имеет **три зажима**, обозначаемые буквами **Л, Я, Ш**.

Зажим **Л** соединен с движком реостата и подключается к одному из полюсов рубильника (к линии). Зажим **Я** соединяется с сопротивлением реостата и подключается к зажиму якоря. Зажим **Ш** соединен с металлической шиной, помещенной на реостате (шунт).

Движок реостата скользит по шине так, что между ними имеется непрерывный контакт. К зажиму **Ш** через регулировочное сопротивление  $R_p$  присоединяется обмотка возбуждения. Вторые зажимы якоря и

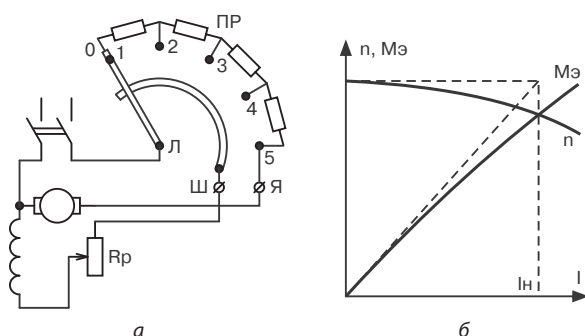


Рис. 9.20. Схема (а) и характеристики (б) двигателя параллельного возбуждения

обмотки возбуждения соединены между собой перемычкой и подключены ко второму полюсу рубильника, включающего двигатель в сеть.

При пуске в ход включается рубильник и движок реостата переводится на контакт 1, так что последовательно с якорем соединено полное сопротивление пускового реостата ПР, которое выбирается таким, чтобы наибольший ток при пуске в ход  $I_{\max}$  не превышал номинальный ток более чем в 1,7—2,5 раза, т. е.

$$R_{\Pi} = U/I_{\max} - R_{\text{я}}.$$

При включении двигателя в сеть по обмотке возбуждения также проходит ток, возбуждающий магнитный поток. В результате взаимодействия тока в якоре с магнитным полем полюсов создается пусковой момент.

Если пусковой момент окажется больше тормозного момента на валу двигателя ( $M_{\text{пуск}} > M_{\text{т}}$ ), то якорь машины придет во вращение.

Под действием инерции частота вращения не может претерпевать мгновенных изменений и будет постепенно увеличиваться. Вместе с ней возрастает противо-ЭДС, и ток в якоре начнет уменьшаться. Это вызывает уменьшение вращающего момента двигателя.

В рабочем режиме сопротивление пускового реостата должно быть полностью выведено, так как оно рассчитано на кратковременный режим работы и при длительном прохождении тока выйдет из строя.

Когда ток в якоре уменьшится до небольшого значения  $I_{\min}$ , движок пускового реостата переводится на контакт 2. При этом сопротивление пускового реостата уменьшится на одну ступень, что увеличит ток.

Сопротивление всех ступеней пускового реостата выбирают так, чтобы при переводе движка реостата с одного контакта на другой ток в якоре изменялся от  $I_{\min}$  до  $I_{\max}$ .

С увеличением тока в якоре возрастает вращающий момент, вследствие чего частота вращения вновь увеличивается. С увеличением частоты вращения якоря возрастает противо-ЭДС, что вызовет уменьшение тока в якоре.

Когда ток в якоре достигает вновь наименьшего значения, движок реостата переводится на контакт 3.

Таким образом, сопротивление пускового реостата постепенно (ступенями) уменьшается, пока оно полностью не будет выведено (движок реостата на контакте 5), и в рабочем режиме ток и частота вращения якоря принимают установившиеся значения, соответствующие тормозному моменту на валу двигателя. Наименьший ток при пуске в ход зависит от режима работы двигателя.

Если двигатель пускается при полной нагрузке, то  $I_{\min} = 1,1I_n$ .



**Примечание.**

*При пуске двигателя без нагрузки или при малых нагрузках этот ток может быть меньше номинального тока двигателя.*

Число ступеней пускового реостата зависит от разности  $I_{\max} - I_{\min}$ . Причем чем меньше разность этих токов, тем больше число ступеней. Обычно пусковые реостаты имеют от 2 до 7 ступеней.

При пуске двигателя в ход регулировочное сопротивление  $R_v$  в цепи возбуждения должно быть полностью выведено. Т. е. ток возбуждения должен быть наибольшим, что дает возможность уменьшить пусковой ток.

Для пуска двигателя необходимо создать пусковой момент, больший тормозного момента на валу. Так как  $M_{\text{пуск}} = KI_{\text{пуск}}\Phi$ , то для уменьшения пускового тока надо увеличить магнитный поток, т. е. увеличить ток в обмотке возбуждения.

Металлическая шина пускового реостата соединена с зажимом 1. Это необходимо для того, чтобы при отключении двигателя от сети не было разрыва цепи обмотки возбуждения, имеющей значительную индуктивность.

При отключении двигателя движок пускового реостата переводится на холостой контакт 0 и рубильник отключается. При этом обмотка возбуждения будет замкнута на сопротивление пускового реостата и якоря, что дает возможность избежать перенапряжений и дугообразования.

### Характеристики двигателей постоянного тока

Рабочие свойства двигателей определяются их рабочими характеристиками, представляющими собой зависимости частоты вращения  $n$ , вращающего момента  $M_z$ , потребляемого тока  $I$ , мощности  $P_1$  и КПД  $\eta$  от полезной мощности на валу  $P_2$ .

Эти зависимости соответствуют естественным условиям работы двигателя, т. е. машина не регулируется, а напряжение сети остается постоянным.

При изменении полезной мощности  $P_2$  (т. е. нагрузки на валу) изменяется также и ток в якоре машины, поэтому рабочие характеристики часто строятся в зависимости от тока в якоре.

Зависимости вращающего момента и частоты вращения от тока в якоре для двигателя параллельного возбуждения изображены на (рис. 9.20, б). Частота вращения двигателя определяется следующим выражением:

$$n = (U - IR_{\text{я}})/C\Phi.$$

С увеличением нагрузки на валу двигателя возрастает также и ток в якоре. Это вызывает увеличение падения напряжения в сопротивлении обмотки якоря и щеточных контактах.

Так как ток возбуждения остается неизменным (машина нерегулируема), то магнитный поток также постоянен.

Однако при повышении тока в якоре увеличивается размагничивающее действие потока реакции якоря и магнитный поток  $\Phi$  несколько уменьшится.

Увеличение  $IR_{\text{я}}$  вызывает понижение частоты вращения двигателя, а уменьшение  $\Phi$  повышает частоту. Обычно падение напряжения влияет на изменение частоты в несколько большей степени, чем реакция якоря, так что с увеличением тока в якоре частота уменьшается.

Изменение частоты вращения у двигателя этого типа незначительно. Оно не превышает 5% при изменении нагрузки от нуля до номинальной. Т. е. двигатели параллельного возбуждения имеют жесткую скоростную характеристику.

Вращающий момент двигателя определяется так:  $M_z = KI\Phi$ .

При неизменном магнитном потоке зависимость момента от тока в якоре может быть представлена прямой линией. Но под воздействием реакции якоря с увеличением нагрузки в некоторой степени уменьшится магнитный поток, и зависимость момента отклонится вниз от прямой линии.

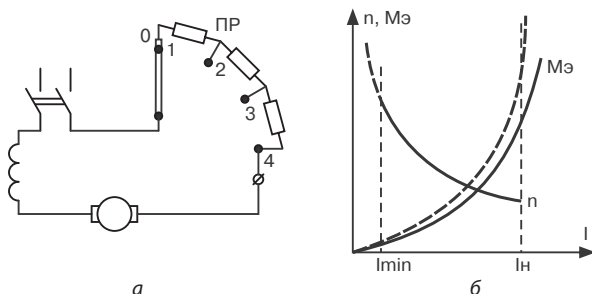


Рис. 9.21. Схема (а) и характеристики (б) двигателя последовательного возбуждения

Схема двигателя последовательного возбуждения показана на рис. 9.21, а. Пусковой реостат этого двигателя имеет только два зажима, так как обмотка возбуждения и якорь образуют одну последовательную цепь.

Характеристики двигателя изображены на рис. 9.21, б. Частота вращения двигателя последовательного возбуждения определяется следующим выражением:

$$n = (U - I(R_{\text{я}} + R_{\text{с}}))/C\Phi,$$

где  $R_{\text{с}}$  — сопротивление последовательной обмотки возбуждения.

В двигателе последовательного возбуждения магнитный поток не остается постоянным, а резко изменяется с изменением нагрузки. Это вызывает значительное изменение частоты вращения. Так как падение напряжения в сопротивлении якоря и в обмотке возбуждения очень мало в сравнении с приложенным напряжением, то частоту вращения можно приближенно определить следующим выражением:

$$n = U/C\Phi.$$

Если пренебречь насыщением стали, то можно считать магнитный поток пропорциональным току в обмотке возбуждения, который равен току в якоре.



#### Вывод.

Следовательно, у двигателя последовательного возбуждения частота вращения обратно пропорциональна току в якоре и она резко уменьшается с увеличением нагрузки, т. е. двигатель имеет мягкую скоростную характеристику.

**Внимание.**

*С уменьшением нагрузки частота вращения двигателя увеличивается. При холостом ходе ( $I_a = 0$ ) частота вращения двигателя бесконечно возрастает, т. е. двигатель идет в разнос. Таким образом, характерным свойством двигателей последовательного возбуждения является недопустимость сброса нагрузки, т. е. работы вхолостую или при малых нагрузках.*

Двигатель имеет минимальную допустимую нагрузку, составляющую 25—30% номинальной. При нагрузке меньше минимально допустимой частота вращения двигателя резко увеличивается, что может вызвать его разрушение. Поэтому, когда возможны сбросы или резкие уменьшения нагрузки, двигатели последовательного возбуждения не применяют.

В двигателях очень малых мощностей сброс нагрузки не вызывает разброса, так как механические потери их будут достаточно большой нагрузкой для них.

Вращающий момент двигателя последовательного возбуждения, учитывая пропорциональную зависимость между магнитным потоком и током в якоре ( $\Phi = C'I$ ), можно определить следующим выражением:

$$M_s = K\Phi = K'I^2$$

где  $K' = KC'$ , т. е. вращающий момент пропорционален квадрату тока.

Однако при больших токах сказывается насыщение стали и зависимость момента приближается к прямой линии.

**Примечание.**

*Таким образом, двигатели этого типа развивают большие вращающие моменты, что имеет существенное значение при пуске больших инерционных масс и перегрузках. Эти двигатели широко используют в транспортных и подъемных устройствах.*

При смешанном возбуждении возможно как согласное, так и встречное включение обмоток возбуждения.

Двигатели со встречным включением обмоток не нашли широкого применения, так как они обладают плохими пусковыми свойствами и работают неустойчиво.

Характеристики двигателей смешанного возбуждения занимают промежуточное положение между характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения.

### Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока

Двигатели постоянного тока получили широкое распространение и часто являются незаменимыми благодаря ценному свойству — возможности плавно и экономично регулировать частоту вращения в широких пределах.

Частота вращения якоря двигателя при любой схеме возбуждения определяется следующим выражением:

$$n = (U - I (R_{\text{я}} - R_c)) / C\Phi,$$

где  $R_c$  — сопротивление последовательной обмотки возбуждения (для двигателя параллельного возбуждения  $R_c = 0$ ).

Это выражение показывает, что частота вращения двигателя зависит от напряжения сети, сопротивления цепи якоря и магнитного потока.

Частоту вращения регулируют путем изменения напряжения сети в том случае, когда источником электрической энергии двигателя является какой-либо генератор.

Для регулирования частоты вращения двигателя изменением сопротивления цепи якоря используют регулировочный реостат, включенный последовательно с якорем.

В отличие от пускового регулировочный реостат должен быть рассчитан на длительное прохождение тока. В сопротивлении регулировочного реостата происходит большая потеря энергии, вследствие чего резко уменьшается КПД двигателя.

Регулируют частоту вращения якоря двигателя изменением магнитного потока, который зависит от тока в обмотке возбуждения.

В двигателях параллельного и смешанного возбуждения для изменения тока включают регулировочный реостат, а в двигателях последовательного возбуждения для этой цели шунтируют обмотку возбуждения каким-либо регулируемым сопротивлением.

Последний способ регулирования частоты практически не создает дополнительных потерь и экономичен.

### Потери и КПД машин постоянного тока

В машинах постоянного тока при работе происходит потеря энергии, которая складывается из трех составляющих.

**Первой составляющей** являются потери в стали  $P_{ст}$  на гистерезис и вихревые токи, возникающие в сердечнике якоря. При вращении якоря машины сталь его сердечника непрерывно перемагничивается. На ее перемагничивание затрачивается мощность, называемая **потерями на гистерезис**.

Одновременно при вращении якоря в магнитном поле в сердечнике его индуцируются вихревые токи. Потери на гистерезис и вихревые токи, называемые потерями в стали, обращаются в тепло и нагревают сердечник якоря.

Потери в стали зависят от магнитной индукции и частоты перемагничивания сердечника якоря.

Магнитная индукция определяет ЭДС машины или, иначе, напряжение, а частота перемагничивания зависит от частоты вращения якоря. Поэтому при работе машины постоянного тока в режиме генератора или двигателя потери в стали будут постоянными, не зависящими от нагрузки, если напряжение на зажимах якоря и частота его вращения постоянны.

Ко **второй составляющей** относятся потери энергии на нагревание проводов обмоток возбуждения и якоря проходящими по ним токами, называемые **потерями в меди**, —  $P_{обм}$ .

Потери в обмотке якоря и в щеточных контактах зависят от тока в якоре, т. е. являются переменными, меняются при изменениях нагрузки.

**Третья составляющая** — механические потери  $P_{мех}$ , представляющие собой потери энергии на трение в подшипниках, трение вращающихся частей о воздух и щеток о коллектор. Эти потери зависят от частоты вращения якоря машины. Поэтому механические потери также постоянны, не зависят от нагрузки.

КПД машины в процентах:

$$\eta = (P_2/P_1) \times 100\%$$

где  $P_2$  — полезная мощность;

$P_1$  — потребляемая машиной мощность.

При работе машины генератором полезная мощность  $P_2 = UI$ , где  $U$  — напряжение на зажимах генератора;  $I$  — ток в нагрузке.



## 9.6. Вопросы для тестирования

### Вопрос №1.

Почему на практике не применяют генератор постоянного тока последовательного возбуждения?

*а) Напряжение на зажимах генератора резко изменяется при изменении нагрузки; б) напряжение на зажимах генератора не изменяется при изменении нагрузки; в) ЭДС уменьшается при увеличении нагрузки; г) ЭДС генератора не изменяется.*

### Вопрос №2.

При постоянном напряжении питания двигателя постоянного тока параллельного возбуждения магнитный поток возбуждения уменьшился. Как изменилась частота вращения?

*а) Уменьшилась; б) не изменилась; в) увеличилась; г) периодически изменяется.*

### Вопрос №3.

Регулировочная характеристика генератора постоянного тока независимого возбуждения — это зависимость...

*а) Нет зависимости; б) ...  $E$  от  $I_{\text{возб}}$ ; в) ...  $I_{\text{возб}}$  от  $I_{\text{нагр}}$ ; г) ...  $U$  от  $I_{\text{нагр}}$ .*

### Вопрос №4.

Номинальный ток двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением  $I_{\text{ном}} = 50$  А. Чему равен ток обмотки возбуждения?

*а) 100 А; б) 50 А; в) 25 А; г) 250 А.*

### Вопрос №5.

Почему сердечник якоря машины постоянного тока набирают из листов электротехнической стали, изолированных между собой?

*а) Для уменьшения потерь мощности от перемагничивания и вихревых токов; б) из конструктивных соображений; в) для уменьшения магнитного сопротивления потоку возбуждения; г) для шумопонижения.*

**Вопрос №6.**

Генератор постоянного тока смешанного возбуждения это генератор, имеющий:

*а) ... параллельную обмотку возбуждения; б) ... последовательную обмотку возбуждения; в) ... параллельную и последовательную обмотки возбуждения; г) ... особые обмотки возбуждения.*

**Вопрос №7.**

Каково назначение реостата в цепи обмотки возбуждения двигателя постоянного тока?

*а) Ограничить пусковой ток; б) регулировать напряжение на зажимах; в) увеличивать пусковой момент; г) регулировать скорость вращения.*

**Вопрос №8.**

Мощность, потребляемая двигателем постоянного тока из сети  $P_1 = 1,5$  кВт. Полезная мощность, отдаваемая двигателем в нагрузку,  $P_2 = 1,125$  кВт. Определить КПД двигателя.

*а) 80%; б) 75%; в) 85%; г) 90%.*

**Вопрос №9.**

Что произойдет с ЭДС генератора параллельного возбуждения при обрыве цепи возбуждения?

*а) ЭДС увеличится; б) ЭДС не изменится; в) ЭДС снизится до  $E_{ост}$ ; г) ЭДС станет равной нулю.*

**Вопрос №10.**

Пусковой ток двигателя постоянного тока превышает номинальный ток из-за:

*а) отсутствия противо-ЭДС в момент пуска; б) малого сопротивления обмотки якоря; в) большого сопротивления обмотки возбуждения; г) малого сопротивления обмотки возбуждения.*

## ЗНАКОМЬТЕСЬ: ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ И ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ



*Сделав ДЕСЯТЫЙ шаг, вы познакомитесь с полупроводниковыми приборами (диодами, транзисторами, тиристорами, микросхемами), которые составляют основу любой электронной схемы. Узнаете вы и о газоразрядных приборах: что такое ионизация газа и электрический заряд, как работают фотоэлементы и многое другое. И в завершении — ответите на вопросы для самотестирования.*

### 10.1. Первое знакомство с полупроводниковыми приборами

#### Электропроводность полупроводников

Полупроводниками называются материалы, занимающие промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Особенностью металлических проводников является наличие свободных электронов — носителей электрических зарядов.

В диэлектриках свободных электронов нет, и поэтому они не проводят тока. В отличие от проводников полупроводники имеют не только электронную, но и «дырочную» проводимости, которые в сильной степени зависят от температуры, освещенности, сжатия, электрического поля и других факторов.

Химическую связь двух соседних атомов с образованием на одной орбите общей пары электронов (рис. 10.1, а) называют **ковалентной** или **парноэлектронной**. Ее условно изображают двумя линиями, соединяющими электроны (рис. 10.1, б).

Например, германий принадлежит к элементам четвертой группы периодической системы элементов Менделеева и имеет на внешней орбите четыре валентных электрона. Каждый атом в кристалле гер-

мания образует ковалентные связи с четырьмя соседними атомами (рис. 10.1, в).

При отсутствии примесей и температуре, близкой к абсолютному нулю, все валентные электроны атомов в кристалле германия взаимно связаны и свободных электронов нет, так что германий не обладает проводимостью.

При повышении температуры или при облучении увеличивается энергия электронов, что приводит к частичному нарушению ковалентных связей и появлению свободных электронов. Уже при комнатной температуре под действием внешнего электрического поля свободные электроны перемещаются, и в кристалле возникает электрический ток.

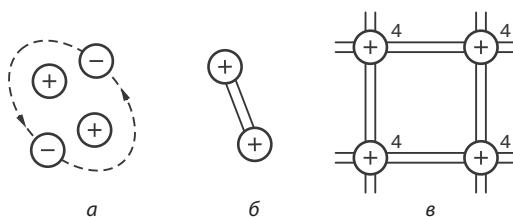


Рис. 10.1. Кристаллическая решетка полупроводника:

а — парноэлектронная (ковалентная) связь атомов;  
б — схематическое изображение;  
в — связи в кристаллической решетке германия



#### Определение.

Электропроводность, обусловленная перемещением свободных электронов, называется **электронной проводимостью полупроводника, или n-проводимостью**.

При появлении свободных электронов в ковалентных связях образуется свободное, не заполненное электроном (вакантное) место — «**электронная дырка**». Так как дырка возникла в месте отрыва электрона от атома, то в области ее образования возникает избыточный положительный заряд.

При наличии дырки какой-либо из электронов соседних связей может занять место дырки и нормальная ковалентная связь в этом месте восстановится, но будет нарушена в том месте, откуда ушел электрон. Новую дырку может занять еще какой-нибудь электрон и т. д. Схема образования и заполнения дырки условно показана на рис. 10.2.

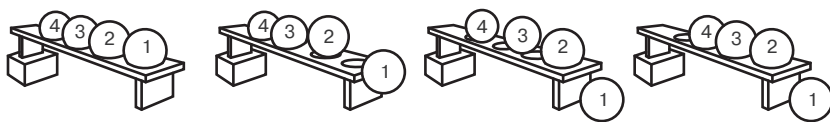


Рис. 10.2. Образование и заполнение дырок в кристалле германия

В установленной наклонно подставке имеется четыре отверстия (дырки), в которых расположено четыре шара (электрона). Если шар 1 сместится вправо, то он освободит отверстие (дырку) и упадет с подставки, а в отверстие, которое занимал этот шар, переместится шар 2. Свободное отверстие (дырку) шара 2 займет шар 3, а отверстие последнего — шар 4.

Под действием внешнего электрического поля дырки перемещаются в направлении сил поля, т. е. противоположно перемещению электронов.



#### Определение.

*Проводимость, возникающая в результате перемещения дырок, называется **дырочной проводимостью**, или **p-n проводимостью**.*

Таким образом, при электронной проводимости один свободный электрон проходит весь путь в кристалле, а при дырочной проводимости большое число электронов поочередно замещают друг друга в ковалентных связях и каждый из них проходит свой отрезок пути.

В кристалле чистого полупроводника при нарушении ковалентных связей возникает одинаковое число свободных электронов и дырок. Одновременно с этим происходит обратный процесс — **рекомбинация**, при которой свободные электроны заполняют дырки, образуя нормальные ковалентные связи.

При определенной температуре число свободных электронов и дырок в единице объема полупроводника в среднем остается постоянным. При повышении температуры число свободных электронов и дырок сильно возрастает и проводимость германия значительно увеличивается.

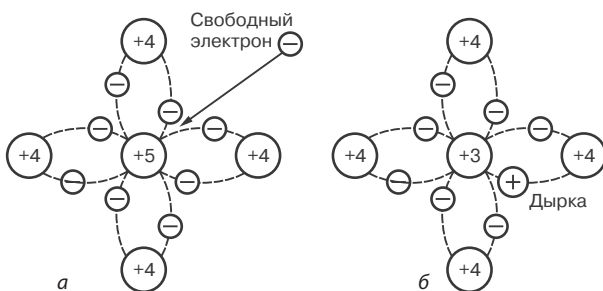


#### Определение.

*Электропроводность полупроводника при отсутствии в нем примесей называется его **собственной электропроводностью**.*

Свойства полупроводника в сильной степени меняются при наличии в нем ничтожного количества примесей. Вводя в кристалл полупроводника атомы других элементов, можно получить в кристалле преобладание свободных электронов над дырками или, наоборот, преобладание дырок над свободными электронами.

Например, при замещении в кристаллической решетке атома германия атомом пятивалентного вещества (мышьяка, сурьмы, фосфора) четыре электрона этого вещества образуют заполненные связи с соседними атомами германия, а пятый электрон окажется свободным (рис. 10.3, а). Поэтому такая примесь увеличивает электронную проводимость (**n**-проводимость) и называется **донорной**.



**Рис. 10.3.** Схема связи примесей с германием:  
а — пятивалентной (донорной);  
б — трехвалентной (акцепторной)

При замещении атома германия атомом трехвалентного вещества (индий, галлий, алюминий) его электроны вступают в ковалентную связь с тремя соседними атомами германия, а связи с четвертым атомом германия будут отсутствовать, так как у индия нет четвертого электрона (рис. 10.3, б).

Восстановление всех ковалентных связей возможно, если недостающий четвертый электрон будет получен от ближайшего атома германия. Но в этом случае на месте электрона, покинувшего атом германия, появится дырка, которая может быть заполнена электроном из соседнего атома германия.

Последовательное заполнение свободной связи эквивалентно движению дырок.



#### Определение.

Примеси с меньшим числом валентных электронов в атоме по сравнению с атомом данного полупроводника вызывают преобладание дырочной проводимости и называются **акцепторными**.

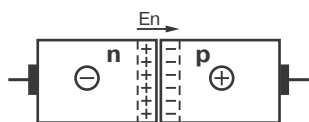


#### Определение.

Носители заряда, определяющие вид проводимости в примесном полупроводнике, называются **основными** (дырки в **p**-полупроводнике и электроны в **n**-полупроводнике), а носители заряда противоположного знака — **неосновными**.

## Полупроводниковые диоды

**Полупроводниковый диод (вентиль)** представляет собой контактное соединение двух полупроводников, один из которых с электронной проводимостью (**n**-типа), а другой — с дырочной (**p**-типа). Принцип действия представлен на **рис. 10.4**.



**Рис. 10.4.** Полупроводниковый диод

Вследствие большой концентрации электронов в полупроводнике **n**-типа будет происходить диффузия их из первого полупроводника во второй. Аналогично будет происходить диффузия дырок из второго полупроводника **p**-типа в первый **n**-типа.

В тонком пограничном слое полупроводника **n**-типа возникает положительный заряд, а в пограничном слое полупроводника **p**-типа — отрицательный заряд. Между этими слоями возникает разность потенциалов (потенциальный барьер) и образуется электрическое поле напряженностью  $E_n$ , которая препятствует диффузии электронов и дырок из одного полупроводника в другой.

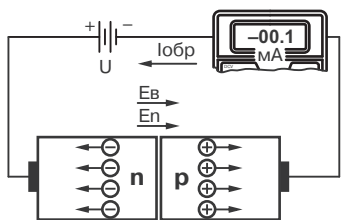
Таким образом, на границе двух полупроводников возникает тонкий слой, обедненный носителями зарядов (электронов и дырок) и обладающий большим сопротивлением. Этот слой называется **запирающим p-n-переходом**.

Вследствие теплового движения в электрическое поле **p-n-перехода** попадают неосновные носители зарядов (электроны из **p**-области и дырки из **n**-области).



### Определение.

*Движение неосновных носителей зарядов под действием сил поля **p-n-перехода** направлено встречно диффузионному току основных носителей и называется **дрейфовым** или **тепловым током**, зависящим в сильной степени от температуры.*



**Рис. 10.5.** Схема включения диода в обратной полярности

На **рис. 10.5** внешнее электрическое поле  $E_v$  направлено согласно с полем **p-n-перехода**  $E_n$ . При отсутствии внешнего электрического поля дрейфовый ток уравновешивается диффузионным, и суммарный ток через **p-n-переход** равен нулю.

Соединив положительный зажим источника питания с металлическим электро-

дом полупроводника **n**-типа, а отрицательный зажим с электродом полупроводника **p**-типа, получим внешнее электрическое поле  $E_v$ , направленное согласно с полем **p-n**-перехода  $E_n$ , усиливающее его (рис. 10.5).

Такое поле еще больше будет препятствовать прохождению основных носителей зарядов через запирающий слой и через диод пройдет малый обратный ток  $I_{обр}$ , обусловленный неосновными носителями заряда.

На рис. 10.6 внешнее электрическое поле  $E_v$  направлено встречно полю **p-n**-перехода  $E_n$ . Обратный ток диода в значительной мере зависит от температуры, увеличиваясь с ее повышением.

При изменении полярности источника питания (рис. 10.6) внешнее электрическое поле  $E_v$  окажется направленным встречно полю **p-n**-перехода  $E_n$  и под действием этого поля электроны и дырки начнут двигаться навстречу друг другу и число основных носителей заряда в переходном слое возрастет, уменьшая потенциальный барьер и сопротивление переходного слоя.

Таким образом, в цепи устанавливается прямой ток  $I_{пр}$ , который будет значительным даже при относительно небольшом напряжении источника питания  $U$ .

На рис. 10.7 показана вольтамперная характеристика германиевого диода и его условное обозначение. Для большей наглядности прямая ветвь (правая часть графика) и обратная ветвь (левая часть графика) характеристики изображены в различных масштабах.

Характеристика показывает, что при небольшом прямом напряжении  $U_{пр} = 1$  В на зажимах диода в его цепи проходит относительно большой ток, а при значительных обратных напряжениях  $U_{обр}$  ток  $I_{обр}$  ничтожно мал.

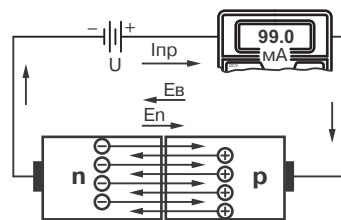


Рис. 10.6. Схема включения диода в прямую полярности

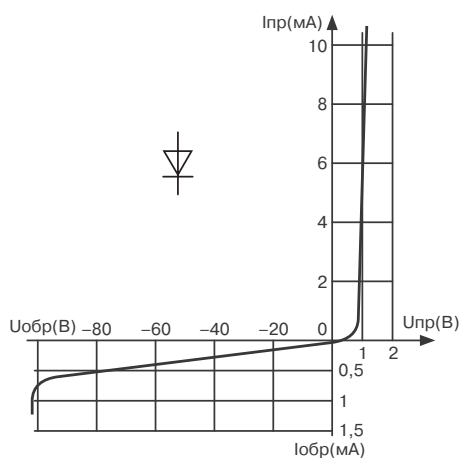


Рис. 10.7. Вольтамперная характеристика германиевого диода и его условное обозначение





### Вывод.

Таким образом, полупроводниковый диод обладает односторонней проводимостью, т. е. является электрическим вентилям.

Электрические вентили бывают германиевые, кремниевые, селеновые и медно-закисные. Германиевые и кремниевые вентили изготовляют двух типов: точечные и плоскостные.

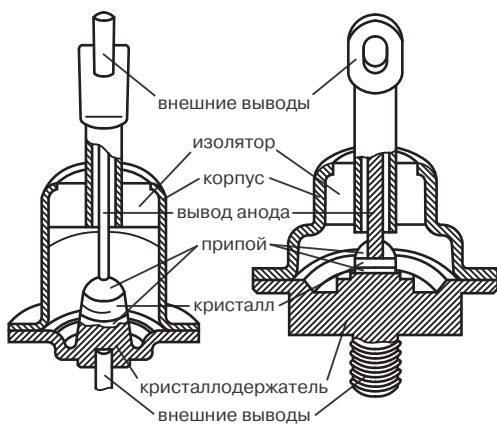


Рис. 10.8. Конструкция германиевого диода:  
а — точечного; б — плоскостного

У точечного германиевого диода (рис. 10.8, а) помещен кристалл германия с электронной проводимостью, в который острием входит контактный пружинящий вывод анода. Под контактным острием в результате специальной термической обработки создается область с дырочной проводимостью.

В плоскостном германиевом диоде (рис. 10.8, б) на пластину германия с электронной проводимостью накладывается таблетка из индия. Она в процессе изготовления диода нагревается до 500°C и плавится так, что ее атомы диффундируют в германий, образуя область с дырочной проводимостью.

На границе двух областей (с электронной и дырочной проводимостью) появляется запирающий  $p-n$ -переход. Как в точечном, так и в плоскостном диоде германий припоем укреплен на кристаллодержателе, к которому приварен вывод катода (нижний).

Вывод анода также припоем укрепляется в области с дырочной проводимостью и выводится наружу в верхней части диода. Металлический корпус сварен с кристаллодержателем и стеклянным изолятором.

Кремниевые диоды отличаются от германиевых не только материалом полупроводника, но и некоторыми преимуществами, а именно:

- ♦ более высокой предельной температурой;
- ♦ существенно меньшим обратным током;
- ♦ более высоким пробивным напряжением.

Однако сопротивление кремниевого вентиля в прямом направлении значительно больше, чем германиевого.

**Селеновый вентиль** состоит из алюминиевого диска, с одной стороны покрытого слоем кристаллического селена, обладающего дырочной проводимостью, который служит одним электродом.

Другим электродом является нанесенный на селен слой сплава кадмия и олова, при диффузии из которого атомов кадмия в селен образуется слой, обладающий электронной проводимостью.

Селеновые вентили имеют значительно меньшие обратные напряжения (до 60 В) и плотности тока ( $0,1—0,2 \text{ А/см}^2$ ), чем германиевые и кремниевые. Так что их габариты и масса значительно больше.

Однако характеристики селеновых вентилях более стабильны, что позволяет соединять их последовательно и параллельно для увеличения обратных напряжений и прямых токов.

Кроме того, селеновые вентили обладают свойством самовосстановления, которое сводится к следующему: если через пробитую шайбу пропустить большой ток, то селен нагревается и плавится, закрывая место пробоя и восстанавливая вентильное свойство диода.

**Медно-закисный вентиль** состоит из медного диска со слоем закиси меди, к которому прилегает для получения хорошего контакта свинцовый диск с латунным радиатором большого диаметра. Слой закиси меди образуется при термической обработке меди в атмосфере кислорода. Наружный слой закиси меди, полученный при избытке кислорода, обладает дырочной проводимостью, а слой закиси, полученной при недостатке кислорода, — электронной проводимостью. Между этими двумя слоями закиси меди возникает *p-n*-переход.

Медно-закисные вентили имеют низкие обратные напряжения (10 В) и плотности тока ( $0,1 \text{ А/см}^2$ ) и в преобразовательных устройствах не используются. Их применение ограничено измерительными приборами в силу стабильности их характеристик.

## 10.2. Транзисторы

### Первое знакомство



#### Определение.

**Транзистором** называется полупроводниковый прибор с двумя *p-n*-переходами, предназначенный для усиления и генерирования электрических колебаний и представляющий собой пластину кремния или германия, состоящую из трех областей.

Две крайние области всегда обладают одинаковым типом проводимости, а средняя — противоположной проводимостью.

Транзисторы, у которых крайние области обладают электронной проводимостью, а средняя — дырочной проводимостью, называются транзисторами **n-p-n-типа** (рис. 10.9).

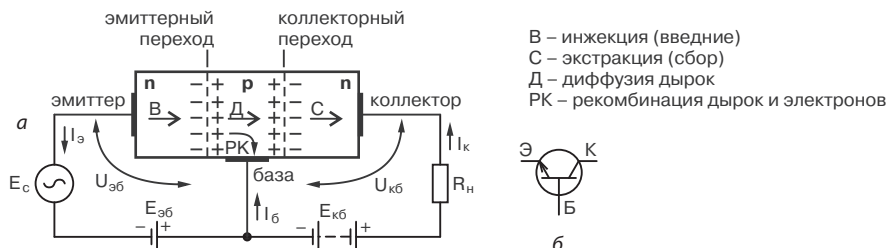


Рис. 10.9. Принцип работы и условное обозначение транзистора n-p-n  
а — принцип работы; б — условное графическое обозначение

Транзисторы, у которых крайние области обладают дырочной, а средняя электронной проводимостями — транзисторами **p-n-p-типа** (рис. 10.10).

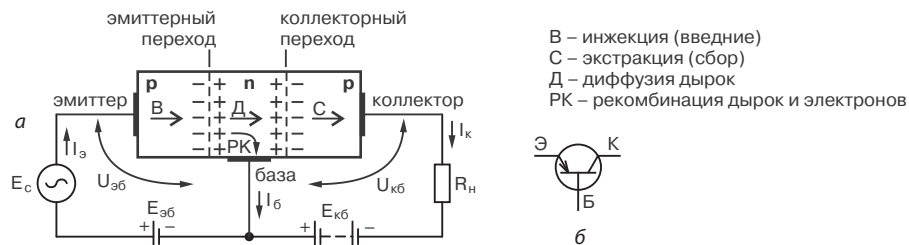


Рис. 10.10. Принцип работы и условное обозначение транзистора p-n-p  
а — принцип работы; б — условное графическое обозначение

Физические процессы, происходящие в транзисторах двух типов, аналогичны. Различия между ними заключается в следующем:

- ♦ полярности включения источников питания противоположны;
- ♦ если в транзисторе **n-p-n-типа** электрический ток создается в основном электронами, то в транзисторе **p-n-p-типа** — дырками.

### Принцип действия транзистора

Смежные области, отделенные друг от друга p-n-переходами, называются эмиттером Э, базой Б и коллектором К.

**Эмиттер** является областью, испускающей (эмитирующей) носители зарядов электронов в транзисторе **n-p-n**-типа и дырок в транзисторе **p-n-p**-типа. **Коллектор** — область, собирающая носители зарядов. **База** — средняя область, основание.

В условиях работы транзистора к левому **p-n**-переходу прикладывается напряжение эмиттер-база  $U_a$  в прямом направлении, а к правому **p-n**-переходу — напряжение база-коллектор  $U_K$  — в обратном.

Под действием электрического поля большая часть носителей зарядов из левой области (эмиттера), преодолевая **p-n**-переход, переходит в очень узкую среднюю область (базу). Далее большая часть носителей зарядов продолжает двигаться ко второму переходу и, приближаясь к нему, попадает в электрическое поле, созданное внешним источником  $U_K$ .

Под влиянием этого поля носители зарядов втягиваются в правую область (коллектор), увеличивая ток в цепи батареи  $U_K$ .

Если увеличить напряжение  $U_a$ , то возрастет количество носителей зарядов, перешедших из эмиттера в базу, т. е. увеличится ток эмиттера на некоторую величину  $\Delta I_a$ . При этом также увеличится ток коллектора на величину  $\Delta I_K$ .

В базе незначительная часть носителей зарядов, перешедших из эмиттера, рекомбинирует со свободными носителями зарядов противоположной полярности, убыль которых пополняется новыми носителями зарядов из внешней цепи, образующими ток базы  $I_b$ .

Таким образом, ток коллектора  $I_K = I_a - I_b$  окажется меньше тока, эмиттера, незначительно отличаясь от последнего. Отношение  $\alpha = \Delta I_K / \Delta I_a$  при  $U_K = \text{const}$  называется коэффициентом усиления по току и обычно имеет значение

$$\alpha = 0,9—0,995.$$

Если цепь эмиттер-база разомкнута и ток в ней равен нулю  $I_a = 0$ , а между коллектором и базой приложено напряжение  $U_K$ , то в цепи коллектора будет проходить небольшой обратный (тепловой) ток  $I_{ко}$ , обусловленный неосновными носителями зарядов.

Этот ток в существенно зависит от температуры, и является одним из параметров транзистора (меньшее его значение соответствует лучшим качествам транзистора).

Так как левый (эмиттерный) **p-n**-переход находится под прямым напряжением, то он обладает малым сопротивлением. На правый же

(коллекторный) **p-n**-переход воздействует обратное напряжение и он имеет большое сопротивление.



**Примечание.**

*Поэтому напряжение, прикладываемое к эмиттеру, весьма мало (десятые доли вольта), а напряжение, подаваемое на коллектор, может быть достаточно большим (до нескольких десятков вольт).*

Изменение тока в цепи эмиттера, вызванное малым напряжением  $U_э$ , создает примерно такое же изменение тока в цепи коллектора, где действует значительно большее напряжение  $U_к$ . В результате этого транзистор осуществляет усиление мощности.

При работе транзистора в качестве усилителя электрических колебаний входное переменное напряжение  $U_{вх}$  (сигнал, подлежащий усилению) подают последовательно с источником постоянного напряжения смещения  $U_{см}$  между эмиттером и базой, а выходное напряжение  $U_{вых}$  (усиленный сигнал) снимается с нагрузочного резистора  $R_n$ .

### Схемы включения транзисторов

Возможны три схемы включения транзисторов **n-p-n**-типа и **p-n-p**-типа (рис. 10.11 и рис. 10.12): с общей базой ОБ, с общим эмиттером ОЭ и с общим коллектором ОК.



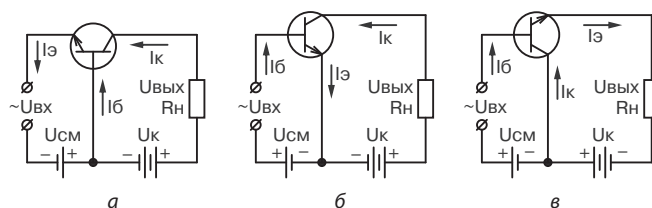
**Примечание.**

*Название схемы показывает, какой электрод транзистора является общим для входной и выходной цепей. Схемы включения транзисторов отличаются своими свойствами, но принцип усиления колебаний остается одинаковым.*

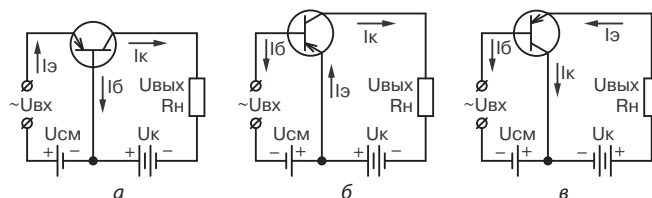
В схеме с общей базой ОБ положительное приращение напряжения на входе  $\Delta U_{вх}$  вызывает увеличение тока эмиттера  $I_э$ , что приводит к увеличению как тока коллектора  $I_к$ , так и напряжения выхода  $\Delta U_{вых}$ , причем  $\Delta U_{вых} \gg \Delta U_{вх}$ .

В схеме с ОБ источник входного напряжения включен в цепь эмиттер-база, а нагрузка и источник питания — в цепь коллектор-база.

Входное сопротивление схемы с ОБ мало (несколько омов или десятков омов), так как эмиттерный переход включен в прямом



**Рис. 10.11.** Схемы включения транзисторов структуры *n-p-n*  
*а* — с общей базой; *б* — с общим эмиттером; *в* — с общим коллектором



**Рис. 10.12.** Схемы включения транзисторов структуры *p-n-p*  
*а* — с общей базой; *б* — с общим эмиттером; *в* — с общим коллектором

направлении. Выходное сопротивление схемы, наоборот, велико (сотни килоомов), так как коллекторный переход включен в обратном направлении.

Малое входное сопротивление схемы с ОБ является существенным ее недостатком, ограничивающим применение ее в усилителях. Через источник входного сигнала в этой схеме проходит весь ток эмиттера, и усиления по току не происходит (коэффициент усиления по току  $\alpha < 1$ ). Усиление по напряжению и по мощности в этой схеме может достигать нескольких сотен.

В схеме с **общим эмиттером** ОЭ источник входного напряжения включен в цепь эмиттер — база, а сопротивление нагрузки  $R_n$  и источник питания — в цепь эмиттер — коллектор, так что эмиттер является общим электродом для входной и выходной цепей.

Входное сопротивление схемы с ОЭ больше, чем у схемы с ОБ, так как входным током в ней является ток базы, который много меньше тока эмиттера и тока коллектора. Это сопротивление составляет сотни омов. Выходное сопротивление схемы с ОЭ велико и может составлять до ста килоомов.

Коэффициент усиления по току  $\beta$  в этой схеме определяется как отношение приращения тока коллектора  $I_k$  к приращению тока базы  $I_b$  при постоянном напряжении на коллекторе, т. е.  $\beta = \Delta I_k / \Delta I_b$  при  $U_k = \text{const}$  и может иметь значения  $\beta = 10\text{—}200$  для различных транзисторов.

Учитывая равенства  $I_3 = I_k + I_6$  и  $\alpha = \Delta I_k / \Delta I_3$ , получим

$$\beta = \Delta I_k / (\Delta I_3 - \Delta I_k) = (\Delta I_k / \Delta I_3) / (1 - \Delta I_k / \Delta I_3) = \alpha / (1 - \alpha).$$

Коэффициент усиления по напряжению  $K_u$  для схемы с ОЭ того же порядка, что и для схемы с ОБ. Коэффициент усиления по мощности  $K_p = K_i K_u$  во много раз больше, чем в схеме с ОБ.

В схеме с общим эмиттером ОЭ при усилении входного напряжения происходит поворот фазы выходного напряжения на половину периода, т. е. на  $180^\circ$ , как это видно из схемы: положительные приращения входного напряжения вызывают отрицательное приращение выходного напряжения, и наоборот.

В схеме с общим коллектором ОК источник входного напряжения включается в цепь базы, а источник питания и сопротивление нагрузки — в цепь эмиттера. Входным током является ток базы, а выходным — ток эмиттера.

Коэффициент усиления по току для этой схемы

$$K_i = \Delta I_3 / \Delta I_6 = \Delta I_3 / (\Delta I_3 - \Delta I_k) = 1 / (1 - \alpha).$$

Входное сопротивление схемы с ОК велико (десятки килоомов), а выходное сопротивление мало (до  $1\text{--}2\text{ кОм}$ ).

Коэффициент усиления по напряжению схемы с общим коллектором  $K_u = 0,9\text{--}0,95$ , т. е. близок к единице, и эту схему часто называют **эмиттерным повторителем**.

Схема с общим коллектором ОК используется для согласования отдельных каскадов усиления, источника сигнала или нагрузки с усилителем.

## Характеристики транзистора



### Определение.

*Характеристиками транзистора называются зависимости между токами и напряжениями во входной и выходной цепях.*

При разных схемах включения транзистора входные и выходные цепи различны, следовательно, и характеристики представляют собой зависимости различных величин для каждой схемы включения.

Так, для схемы с общим эмиттером ОЭ входной цепью является цепь базы, и входная характеристика отражает зависимость тока базы от напряжения эмиттер-база при постоянном напряжении между

эмиттером и коллектором, т. е.  $I_b = f(U_{эб})$  при  $U_{эк} = \text{const}$ .

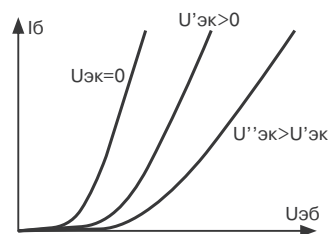
Выходной цепью для этой схемы является цепь коллектора и выходной характеристикой — зависимость тока коллектора от напряжения эмиттер-коллектор при неизменном токе базы, т. е.  $I_k = f(U_{эк})$  при  $I_b = \text{const}$ .

На рис. 10.13 и рис. 10.14 показан примерный вид входных и выходных характеристик транзистора типа **p-n-p**.

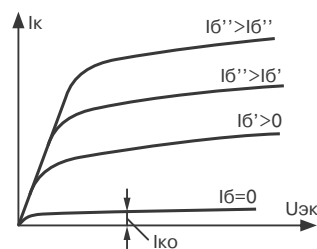
При малых значениях напряжения между эмиттером и базой ( $U_{эб}$ ) ток базы растет медленно из-за большого сопротивления **p-n**-перехода, которое с увеличением тока уменьшается.

С увеличением коллекторного напряжения  $U_{эк}$  входные характеристики смещаются вправо, т. е. с увеличением  $U_{эк}$  необходимо повысить напряжение  $U_{эб}$ , для того чтобы ток базы остался неизменным.

Выходные характеристики показывают, что в рабочей области напряжение  $U_{эк}$  незначительно влияет на коллекторный ток  $I_k$ , так как в основном он зависит от количества дырок, инжектируемых в базу, т. е. от тока эмиттера.



**Рис. 10.13.** Входные статические характеристики транзистора типа **p-n-p**, включенного по схеме с общим эмиттером



**Рис. 10.14.** Выходные статические характеристики транзистора типа **p-n-p**, включенного по схеме с общим эмиттером

### Плоскостной германиевый транзистор

Устройство плоскостного германиевого транзистора **p-n-p**-типа показано на рис. 10.15. Базой является пластина из кристаллического германия с электронной проводимостью. С двух сторон в пластину вплавлены индиевые электроды, служащие эмиттером и коллектором.

При плавлении индия между каждым из этих электродов и германиевой пластиной — базой образуются области с дырочной проводимостью и создаются эмиттерный и коллекторный **p-n**-переходы.

Коллектор крепится на кристаллодержателе, от которого наружу проходит вывод коллектора. Выводы от эмиттера и базы изолированы от корпуса стеклянными проходными изоляторами.

Транзистор помещается в металлический корпус.



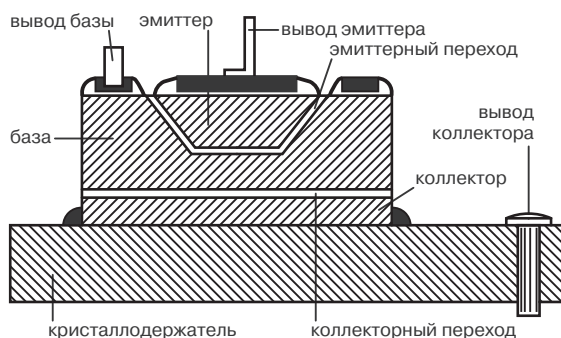


Рис. 10.15. Устройство плоскостного германиевого транзистора типа p-n-p

### Сравнение транзисторов и электронных ламп

Транзисторы, по сравнению с электронными лампами, имеют следующие преимущества:

- ♦ большую механическую прочность и долговечность;
- ♦ постоянную готовность к работе;
- ♦ малые габариты и массу;
- ♦ низкое напряжение питания и высокий КПД.

Кроме того, у транзисторов отсутствует цепь накала и, следовательно, упрощена схема и нет потребления мощности для разогрева катода.

К недостаткам транзисторов относится:

- ♦ зависимость режима работы его от температуры окружающей среды;
- ♦ небольшая выходная мощность;
- ♦ чувствительность к перегрузкам;
- ♦ разброс параметров, вследствие которого отдельные транзисторы одного типа значительно отличаются друг от друга по своим параметрам;
- ♦ большое различие между входными и выходными сопротивлениями.

## 10.3. Тиристоры

### Первое знакомство



#### Определение.

Четырехслойный кремниевый вентиль с двумя электродами (анодом и катодом) называется **динистором**. Если кроме анода и катода имеется третий (управляющий) электрод, то вентиль становится управляемым и называется **тиристором**.

Тиристор, а также динистор имеют четыре слоя — **p-n-p-n** (рис. 10.16), между которыми находятся три **p-n**-перехода  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$ .

У тиристора от средней области **p** имеется вывод — **управляющий электрод У**.

При отключенном управляющем электроде тиристор превращается в динистор.

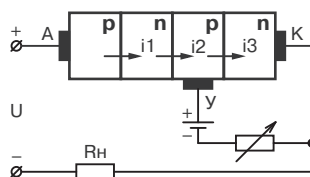


Рис. 10.16. Принцип действия тиристора

### Принцип действия тиристора

Если между анодом и катодом вентиля приложено небольшое постоянное напряжение в прямом направлении, то переходы  $\Pi_1$  и  $\Pi_3$  будут открытыми, а их сопротивление мало. Переход  $\Pi_2$  будет включен в обратном (непроводящем) направлении и его сопротивление велико, так что все приложенное к тиристорному напряжению будет практически на переходе  $\Pi_2$ , а ток в цепи мал.

При повышении напряжения  $U$  на тиристоре ток в цепи увеличивается незначительно, так как ограничивается большим сопротивлением перехода  $\Pi_2$ . Вольтамперная характеристика тиристора подобна обратной ветви характеристики диода (кривая Оа на рис. 10.17).

Если напряжение достигнет некоторого определенного значения, называемого **напряжением переключения**  $U_{пер}$ , то в

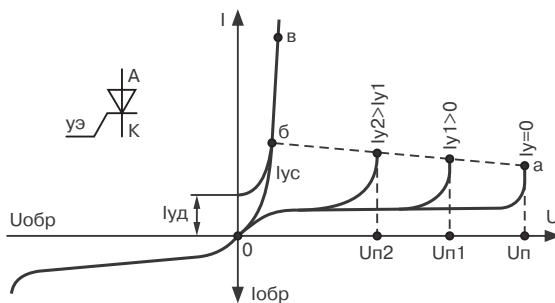


Рис. 10.17. Вольтамперная характеристика тиристора и его условное обозначение

переходе  $\Pi_2$  напряженность электрического поля становится достаточной для ионизации и образования новых свободных носителей зарядов (электронов и дырок), его сопротивление резко уменьшается, и тиристор открывается.

Напряжение на открытом тиристоре (участок бв вольтамперной характеристики) мало (порядка 1—2 В) и почти неизменно, так что ток в цепи ограничивается сопротивлением внешней нагрузки.

Наибольший ток тиристора лимитируется предельно допустимой мощностью, рассеиваемой им. Если уменьшать ток через открытый тиристор, то он будет оставаться открытым до тех пор, пока ток в тиристоре достаточен для поддержания процесса образования носителей зарядов в переходе  $\Pi_2$ .

При токе, меньше определенного значения, называемого **током удержания**  $I_{уд}$ , тиристор закрывается, т. е. возвращается в непроводящее состояние.

Если на управляющий электрод подать положительный потенциал от постороннего источника, то в переходе  $\Pi_3$  возникнет **ток управления** и появятся дополнительные носители зарядов. Вследствие этого уменьшится напряжение переключения этого перехода, и тиристор открывается при меньшем напряжении  $U_{н1}$ .



**Примечание.**

*Чем больше ток управления  $I_y$ , тем больше дополнительных зарядов в переходе  $\Pi_3$  и меньше напряжение переключения тиристора.*

При определенном значении тока управления, называемом **током спрямления**  $I_{yc}$  тиристор будет работать как неуправляемый клапан, т. е. будет открыт при любом положительном напряжении на его аноде.

Таким образом, тиристор открывается как при подаче на его анод напряжения переключения, так и при включении тока управления достаточной величины  $I_{yc}$ .

Так как управляющий электрод после открытия тиристора перестает оказывать влияние на его работу, то в цепи управляющего электрода проходит кратковременный импульс тока прямоугольной формы и длительностью примерно 10 мкс.

При подаче на зажимы тиристора обратного напряжения  $U_{обр}$  он будет закрыт обратными переходами  $\Pi_1$  и  $\Pi_3$  независимо от управляющего тока и его вольтамперная характеристика практиче-

ски не отличается от обратной ветви вольтамперной характеристики неуправляемого вентиля (рис. 10.18).

Тиристоры имеют два устойчивых состояния:

- ♦ при закрытом тиристоре его сопротивление очень велико ( $R \approx \infty$ );
- ♦ при открытом тиристоре его сопротивление мало ( $R \approx 0$ ).

Поэтому тиристоры находят применение как бесконтактные переключатели в инверторах, регулируемых выпрямителях, в схемах защиты и т. д.

### Устройство тиристора

Конструкция мощного тиристора показана на рис. 10.18. Четырехслойная кристаллическая структура, укрепленная на кристаллодержателе, помещена в металлическом корпусе, в нижней части которого находится резьбовой вывод катода. К верхнему р-слою припоем крепится плетеный вывод анода. В среднюю р-область вводится вывод управляющего электрода. Выводы анода и управляющего электрода укрепляются в корпусе изолятором.

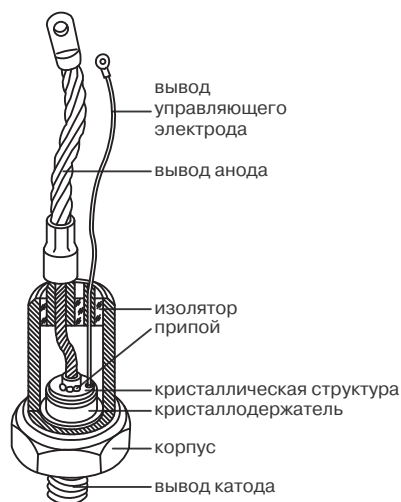


Рис. 10.18. Конструкция мощного тиристора

## 10.4. Ионизация газа и электрический заряд. Фотоэлементы

### Ионизация газа и электрический заряд

В отличие от электронных (вакуумных) ламп в ионных или газоразрядных приборах ток создается не только направленным перемещением свободных электронов, но и вследствие перемещения заряженных частиц газа или паров ртути — ионов.

В обычных условиях газ содержит ничтожное количество свободных электронов и ионов (носителей зарядов) и абсолютное большинство атомов и молекул газа электрически нейтральны (не заряжены). Поэтому в обычных условиях газ является хорошим диэлектриком.

Проводимость газа может быть вызвана его ионизацией сильным электрическим полем, высокой температурой, радиоактивными и космическими лучами. Газ становится проводником, если он содержит большое количество носителей заряда — свободных электронов и ионов.



#### Определение.

*Процесс образования носителей зарядов называется **ионизацией газа**.*

Ионные приборы наполнены разреженным газом или парами ртути. При своем движении электроны сталкиваются с атомами газа или ртутного пара. При соударении электроны отдают часть своей энергии атомам газа. При достаточно большой скорости электрона энергия, полученная атомом, оказывается достаточной для его возбуждения или ионизации.

В возбужденном атоме один из его электронов под действием полученной при соударении энергии переходит на более высокий энергетический уровень (на более удаленную от ядра орбиту). Из-за неустойчивости этого положения очень быстро возвращается на свой прежний уровень, выделяя избыток энергии в виде светового излучения, так что газ будет светиться.

Если энергия, полученная атомами в результате соударения, достаточна для их расщепления на электроны и ионы, то происходит ионизация газа. Скорость движения электронов и их кинетическая энергия зависят от напряжения, т. е. возбуждение и ионизация атомов газа происходит при определенных значениях потенциала возбуждения  $U_{\text{в}}$  и потенциала ионизации  $U_{\text{и}}$ , причем  $U_{\text{и}} > U_{\text{в}}$ . Так, например, для паров ртути  $U_{\text{в}} = 5 \text{ В}$ ,  $U_{\text{и}} = 10 \text{ В}$ .



#### Определение.

*Процесс образования носителей зарядов в результате столкновения свободных электронов с атомами газа называется **ионизацией соударением**, или **ударной ионизацией**.*

В результате соударения свободные электроны могут выбить электроны из нейтральных молекул (атомов) или присоединиться к ним. В первом случае образуются ионы, положительно заряженные, во втором — отрицательно заряженные.

Под действием электрического поля, созданного напряжением, приложенным к электродам прибора, носители зарядов перемещаются в направлении электрического поля (от положительного электрода к отрицательному — положительные ионы, и в противоположном направлении — электроны и отрицательно заряженные ионы).

С увеличением приложенного напряжения возрастают скорости движения носителей зарядов.

При непрерывной ионизации газа с постоянной интенсивностью помимо расщепления атомов газа на электроны и ионы происходит обратный процесс их частичного соединения (**рекомбинация**), т. е. превращения в нейтральные атомы, и число носителей зарядов в единице объема остается постоянным.

Если напряжение между электродами ионного прибора (анодом и катодом) увеличить до определенной величины, называемой **напряжением зажигания  $U_z$** , то скорость электронов и их кинетическая энергия становятся достаточными, чтобы при столкновении с нейтральными атомами ионизировать их.

### Тлеющий разряд

Вновь полученные вторичные заряды также ионизируют нейтральные атомы газа, т. е. процесс ионизации развивается лавинообразно. Промежуток между электродами заполняется ионизированным газом — **газовой плазмой**, обладающей высокой проводимостью.

При этом число свободных электронов, а также ток через прибор резко возрастают, и начинается тлеющий разряд, переходящий в самостоятельный, не требующий внешнего ионизатора для его поддержания.

**Тлеющий разряд** сопровождается свечением газа и характерным шипящим звуком. Поддерживается тлеющий разряд при определенном напряжении между электродами, которое немного меньше напряжения зажигания (на несколько вольт). При таком напряжении положительные ионы, имеющие относительно большую массу, ударяются о поверхность катода, нагревают его и выбивают из него вторичные электроны, которые, двигаясь к аноду, ионизируют атомы газа, поддерживая ток в приборе.

Если напряжение между анодом и катодом окажется меньше необходимого, то скорость движения положительных ионов уменьшается, так что они не могут выбить из катода электроны, вследствие чего процесс ионизации может прекратиться.

Тлеющий разряд используется в неоновых и цифровых лампах, тиратронах, стабилитронах и других приборах.

### Дуговой разряд

Если в приборе с тлеющим разрядом увеличить ток сверх определенного, наибольшего допустимого значения, то возникнет **дуговой разряд**, который опасен для прибора тлеющего разряда, так как вызывает разрушение катода вследствие бомбардировки его тяжелыми положительными ионами с большой силой.

При дуговом разряде плотность тока значительно больше, чем при тлеющем разряде. Таким образом, дуговой разряд может возникнуть при тлеющем разряде, если напряжение на разрядном промежутке повысить до некоторого значения, называемого **напряжением зажигания дуги**. При этом дуга поддерживается вследствие термоэлектронной эмиссии катода, раскаленного ударами положительных ионов, и разряд называется самостоятельным.

Если термоэлектронная эмиссия катода создается нагревом катода от постороннего источника питания, то дуговой разряд будет **несамостоятельным**.

**Электрическая дуга** возникает как в разряженном газе, так и при нормальном давлении. Если сблизить два электрода до их соприкосновения, то место их соприкосновения сильно нагревается проходящим током, обеспечивая ионизацию междуэлектродного промежутка и возникновение дуги при раздвинутых электродах.

Электрическая дуга имеет очень высокую температуру и яркость, которые увеличиваются с повышением напряжения. Впервые электрическая дуга, открытая русским ученым В. В. Петровым в 1802 г., используется в электросварке, электрических печах, мощных прожекторах в качестве ламп и др.

Сходство с дуговым разрядом имеет искровой разряд, при котором происходит кратковременный (импульсный) пробой промежутка между двумя электродами.

Кроме перечисленных выше видов электрического разряда в практике можно часто наблюдать коронный разряд, который возникает

на поверхности проводов малого сечения или на заостренных концах проводов, т. е. там, где образуются значительные напряженности электрического поля.

При некотором критическом значении напряженности поля возникает тихий разряд, вызванный ионизацией газа и сопровождаемый слабым свечением, заметным в темноте. Такой разряд называется **короной**.

### Газотрон

Газотрон представляет собой двухэлектродный ионный или газоразрядный прибор, предназначенный для выпрямления переменного тока. Стекланный (или металлический) баллон газотрона после создания в нем вакуума заполняется парами ртути или инертным газом при низком давлении. Внутри баллона помещены два электрода (рис. 10.19).

Анод газотрона выполняют из никеля или графита и вывод анода располагают в верхней части колбы, катод вольфрамовый, покрыт слоем оксида.

В мощных газотронах катод помещается внутри цилиндрического экрана для уменьшения тепловых потерь. Для разогрева катода он включается на низкое напряжение накала, величина которого составляет 2,5 В при ртутном наполнении и 5 В при заполнении баллона инертным газом.

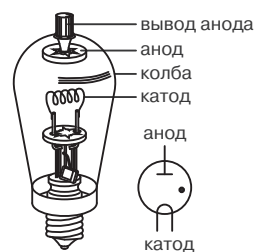


Рис. 10.19. Газотрон



#### Внимание.

*Более высокое напряжение накала недопустимо, так как может возникнуть дуга между концами катода.*

Ионизация газа или паров ртути может произойти при напряжении, значительно меньшем потенциала зажигания под действием последовательного ступенчатого возбуждения атомов. Таким образом, ток накала оказывается большим (амперы и десятки ампер), значительно больше анодного тока, время разогрева катода составляет от нескольких минут до двух-трех десятков минут.

С повышением анодного напряжения от нуля в газотроне возникает небольшой электронный ток, как и в вакуумном диоде, так как



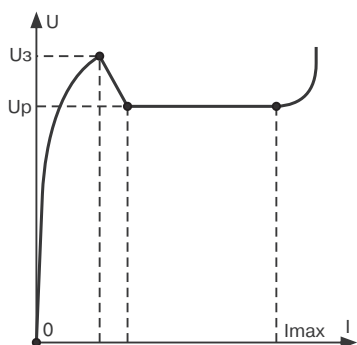


Рис. 10.20. Вольтамперная характеристика газотрона

электроны в слабом электрическом поле перемещаются от катода к аноду с малой скоростью, недостаточной для ионизации газа. Этому режиму работы соответствует начальный участок вольтамперной характеристики (рис. 10.20).

При повышении анодного напряжения до значения, равного потенциалу зажигания  $U_z$ , электроны под действием электрического поля развивают скорости, достаточные для возбуждения ионизации атомов газа или паров ртути, т. е. в при-

боре начнется процесс ионизации газа, вследствие чего образуется плазма и возникает дуговой разряд.

Напряжение анода газотрона при его зажигании несколько уменьшается до рабочего напряжения  $U_p$ , после чего остается почти неизменным при изменении тока в газотроне.

Падение напряжения на открытом газотроне состоит из падения вблизи анода, в плазме и вблизи катода, которое всегда значительно больше первых двух и составляет 10—20 В.



#### Внимание.

Увеличение анодного тока больше максимального значения недопустимо, так как при этом увеличивается падение напряжения вблизи катода и тяжелые положительные ионы с большой силой ударяют в катод, в результате чего разрушается активный слой и газотрон выходит из строя.

Недостатком газотронов является большая чувствительность к изменению напряжения накала, которое допускается в пределах от +10 до -5% от номинального. Повышение напряжения накала выше номинального ведет к распылению катода и уменьшает срок работы газотрона.

При напряжении накала меньше номинального снижается температура катода и уменьшается скорость электронов, вылетевших из катода, в результате чего увеличивается катодное падение напряжения и уменьшается допустимый максимальный ток, т. е. разрушение катода начинается при меньшем анодном токе. Разрушение катода также будет происходить, если включить нагрузку при недостаточно нагретом катоде.

Поэтому перед включением нагрузки катод должен быть прогрет в течение времени, указанного в паспортных данных газотрона.

Новые газотроны перед их включением подвергаются прогреву с малым анодным током (жестчению) для удаления налетов и пятен, которые могут оказаться на электродах при производстве газотронов.

При наполнении парами ртути газотроны имеют больший срок службы, чем при наполнении инертным газом. Но при ртутном наполнении газотроны более чувствительны к изменению температуры окружающей среды.

### Фотоэлементы с внешним фотоэффектом



#### Определение.

**Фотоэлементом** называется электровакуумный, полупроводниковый или ионный прибор, в котором воздействие лучистой энергии оптического диапазона вызывает изменение его электрических свойств.

Внешний фотоэффект или фотоэлектронная эмиссия заключается в том, что источник излучения сообщает части электронов дополнительную энергию, достаточную для выхода их вещества в окружающую среду (в вакуум или разреженный газ).

В вакуумных или электронных фотоэлементах движение происходит в вакууме, в газонаполненных или ионных фотоэлементах электроны перемещаются в разреженном газе и ионизируют атомы газа.

Фотоэлемент с внешним фотоэффектом (рис. 10.21) имеет стеклянную колбу, в которой создан вакуум (в вакуумном фотоэлементе) или после откачки воздуха колба заполнена разреженным газом (аргоном при низком давлении — в ионных фотоэлементах).

Внутренняя поверхность колбы, за исключением небольшого «окна» для прохождения светового потока,

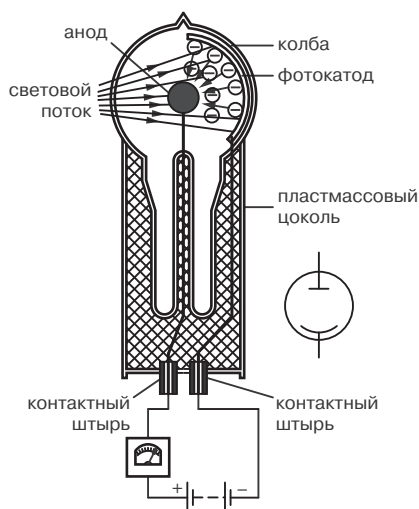


Рис. 10.21. Фотоэлемент с внешним фотоэффектом

покрыта фотокатодом, который представляет собой слой серебра (подложка), на который нанесен полупроводниковый слой окиси цезия.

**Анод** фотоэлемента изготавливают в виде кольца, чтобы он не преграждал путь световому потоку к катоду. Колба помещается в пластмассовом цоколе, в нижней части которого находятся контактные штырьки с выводами от анода и катода.

Под действием приложенного напряжения  $U$  источника питания между анодом и катодом фотоэлемента создается электрическое поле, и электроны, вылетающие с освещенной поверхности катода, направляются к положительно заряженному аноду.

Таким образом, в цепи установится фототок  $I_{\phi}$ , зависимость которого от светового потока  $\Phi$  при неизменном напряжении источника питания называется **световой характеристикой**. В ионном фотоэлементе электроны ионизируют атомы газа и увеличивают поток электронов, т. е. увеличивают ток фотоэлемента, повышая его чувствительность.

Фотоэлектронная эмиссия и фототок фотоэлемента зависят от длины волны светового излучения, поэтому помимо световой чувствительности фотоэлементы характеризуются спектральной чувствительностью.

**Анодные вольтамперные характеристики** фотоэлементов показывают зависимость фототока от приложенного к зажимам фотоэлемента напряжения при неизменном световом потоке, освещающем фотокатод, т. е.  $I_{\phi} = f(U)$  при  $\Phi = \text{const}$ .

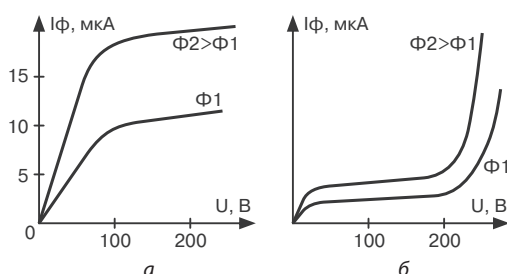


Рис. 10.22. Анодные вольтамперные характеристики фотоэлементов: электронного (а); ионного (б)

У электронного фотоэлемента фототок сначала быстро растет при увеличении напряжения, а затем рост его замедляется и, наконец, почти совсем прекращается, т. е. наступает режим насыщения (рис. 10.22, а).

Для ионных фотоэлементов анодная вольтамперная характеристика после горизонтального участка (электронный ток) поднимается вверх при ионизации газа (рис. 10.22, б).

В процессе работы фотоэлементов их параметры со временем изменяются, т. е. проявляется свойство их «утомляемости».

Обычно фотоэлементы используют совместно с ламповыми или транзисторными усилителями вследствие малого значения фототока, который может быть получен от фотоэлемента.

Наряду с фотоэлементами существуют фотоэлектронные приборы с усилением фототока, называемые **фотоэлектронными умножителями**. Эти приборы с внешним фотоэффектом, в которых фототок усиливается под действием вторичной электронной эмиссии.

### **Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом и с запирающим слоем**

Внутренний фотоэффект заключается в том, что источник излучения световой энергии вызывает увеличение энергии у части электронов вещества, ионизацию атомов и образование новых носителей зарядов (электронов и дырок), вследствие чего уменьшается электрическое сопротивление освещаемого материала.

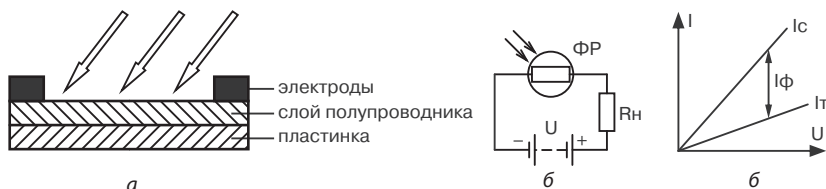
Если при внешнем фотоэффекте электроны покидают пределы освещаемого вещества, то при внутреннем фотоэффекте они остаются внутри вещества, увеличивая количество носителей электрических зарядов.

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом называются **фоторезисторами** (фотосопротивлениями). Они представляют собой полупроводниковые приборы, электрическое сопротивление которых резко изменяется под действием падающего на них светового излучения.

В качестве полупроводников применяют сернистый свинец (фоторезистор ФСА), селенид кадмия (фоторезистор ФСД), сернистый кадмий (фоторезистор ФСК).

Фоторезисторы ФСА применяются в инфракрасной, а остальные — в видимой области света. Чувствительность фоторезисторов значительно выше чувствительности фотоэлементов с внешним фотоэффектом, так что в ряде устройств фоторезисторы заменяют ранее используемые фотоэлементы с внешним фотоэффектом.

Фоторезистор представляет собой (рис. 10.23, а) стеклянную пластинку, на которую нанесен тонкий слой полупроводника, покрытый прозрачным лаком для защиты от механических повреждений и влаги. По краям выведены два металлических электрода. Фоторезистор помещен в пластмассовый корпус с двумя штырьками, к которым присоединяются электроды. Условное обозначение и схема включения фоторезистора показаны на рис. 10.23, б.



**Рис. 10.23. Фоторезистор:**

*а — схема устройства; б — схема включения и условное обозначение ФР;  
в — вольтамперная характеристика*

Фоторезистор работает только от внешнего источника питания и имеет одинаковое сопротивление в обоих направлениях.

Неосвещенный фоторезистор обладает большим «темновым» сопротивлением  $R_t$  (от сотен килоом до нескольких мегаом) и через него проходит малый «темновой» ток  $I_t$ .

При освещенном фоторезисторе его сопротивление резко уменьшается, и ток увеличивается до некоторого значения  $I_c$ , зависящего от интенсивности освещения. Разность между токами при освещении и «темновым» называется фототоком, т. е.

$$I_{\phi} = I_c - I_t.$$

Вольтамперная характеристика фоторезистора (рис. 10.23, в), т. е. зависимость фототока от напряжения источника питания при неизменном световом потоке  $I_{\phi} = f(U)$  при  $\Phi = \text{const}$  линейна.

Видно, что прямая затененной зоны идет более полого, чем освещенного. Это говорит о меньшей чувствительности неосвещенного элемента.

К недостаткам фоторезисторов относится:

- ♦ инерционность (при освещении фототок не сразу достигает своего конечного значения, а лишь через некоторое время);
- ♦ нелинейность световой характеристики (фототок возрастает медленнее, чем сила света);
- ♦ зависимость электрического сопротивления и фототока от температуры окружающей среды.

Фотоэлементы с фотоэффектом в запирающем слое, называемые **вентильными фотоэлементами**, имеют запирающий слой между полупроводниками с р- и n-проводимостями. В этих фотоэлементах под воздействием светового излучения возникает ЭДС, называемая **фото-ЭДС**.

Для изготовления вентильных фотоэлементов применяют селен, сернистый таллий, сернистое серебро, германий и кремний.

Освещение поверхности фотоэлемента вблизи **p-n-перехода** вызывает ионизацию атомов кристалла и образование новых пар свободных носителей зарядов — электронов и дырок.

Под действием электрического поля **p-n-перехода** образующиеся в результате ионизации атомов кристалла электроны переходят в слой **n**, а дырки — в слой **p**, что приводит к избытку электронов в слое **n** и дырок в слое **p**.

Под действием разности потенциалов (фото-ЭДС) между слоями **p** и **n** во внешней цепи проходит ток **I**, направленный от электрода **p** к электроду **n**. Этот ток зависит от количества носителей зарядов — электронов и дырок, т. е. от силы света.

Чувствительность вентильных фотоэлементов высока (до 10 мА/лм), они не требуют источника питания и находят широкое применение в различных областях электроники, автоматики, измерительной техники и т. д.

Принцип устройства кремниевого фотоэлемента с запирающим слоем показан на рис. 10.24.

На пластину кремния с примесью, создающей электронную проводимость, вводят примесь бора путем диффузии в вакууме.

В результате этого образуется слой полупроводника с дырочной проводимостью очень малой толщины, так что световые лучи свободно проникают в зону перехода.

Батареи кремниевых элементов находят применение для непосредственного преобразования солнечной энергии в электрическую. Такие преобразователи, называемые **солнечными батареями**, применяют, например, на искусственных спутниках Земли для питания их аппаратуры.

Полупроводниковый фотоэлемент с двумя электродами, разделенными **p-n-переходом**, называемый **фотодиодом**, может работать как с внешним источником питания (преобразовательный режим), так и без внешнего источника (генераторный режим).

При работе в **генераторном режиме** фотодиода его освещение вызывает возникновение фото-ЭДС, под действием которой во внешней цепи через нагрузку проходит ток, т. е. источником питания является фотодиод.

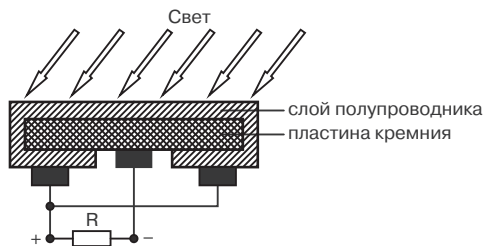


Рис. 10.24. Схема устройства кремниевого вентильного фотоэлемента

При работе в **фотопреобразовательном режиме** напряжение внешнего источника питания приложено встречно фото-ЭДС и фотодиод подобен фоторезистору с более высокой чувствительностью.

Если фотодиод не освещен, то через него проходит небольшой обратный ток (темновой ток) под действием внешнего источника питания. При освещении электронной области фотодиода образуются носители зарядов — электроны и дырки. Дырки доходят до **p-n**-перехода и под действием электрического поля переходят в **p**-область, т. е. освещение вызывает увеличение числа перешедших неосновных носителей из **n**-области в **p**-область, и, следовательно, ток в цепи возрастает (возникает фототок).

## 10.4. Вопросы для тестирования

### *Вопрос №1.*

В каких схемах нецелесообразно использовать транзисторы?

- а) В схемах генерации высокочастотных колебаний; б) в схемах усиления мощности сигналов; в) в схемах выпрямления переменных токов; г) во всех целесообразно.*

### *Вопрос №2.*

При каких значениях светового потока фоторезистор обладает максимальной чувствительностью?

- а) При малых; б) при больших; в) при средних; г) чувствительность не зависит от светового потока.*

### *Вопрос №3.*

Какой пробой опасен для электронно-дырочного перехода (**p-n**-перехода)?

- а) Тепловой; б) электрический; в) тот и другой; г) никакой не опасен.*

### *Вопрос №4.*

Управляемые выпрямители выполняются на базе:

- а) ... диодов; б) ... стабилитронов; в) ... биполярных транзисторов; г) ... тиристор.*

**Вопрос №5.**

Как называют средний слой у биполярных транзисторов?

а) Эмиттер; б) коллектор; в) база; г) точка смещения.

**Вопрос №6.**

Укажите полярность напряжения:

а) на эмиттере транзистора типа р-п-р;

б) на коллекторе транзистора типа п-р-п.

а) а, б — плюс; б) а, б — минус; в) а — плюс, б — минус; г) а — минус, б — плюс.

**Вопрос №7.**

Каким способом нельзя перевести тиристор из открытого состояния в закрытое?

- а) Уменьшением до нуля напряжения на основных электродах;
- б) изменением полярности напряжения на основных электродах;
- в) изменением полярности напряжения на управляющем электроде;
- г) всеми можно.

**Вопрос №8.**

Для выпрямления переменного напряжения применяют...

- а) ... однополупериодный выпрямитель; б) ... двухполупериодный выпрямитель с выводом средней точки; в) ... мостовой двухполупериодный выпрямитель; г) ... все перечисленные выпрямители.

**Вопрос №9.**

Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения однополупериодного выпрямителя составляет:

а)  $p = 1,57$ ; б)  $p = 0,67$ ; в)  $p = 0,25$ ; г)  $p = 0,057$ .

**Вопрос №10.**

Из каких элементов можно составить сглаживающие фильтры?

- а) Из резисторов; б) из диодов; в) из конденсаторов, индуктивных катушек, транзисторов, резисторов; г) из потенциометров.



## НАКОНЕЦ, МЫ ДОБРАЛИСЬ ДО РАССМОТРЕНИЯ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОНИКИ



*В ходе финишного шага вы познакомитесь с практическими схемами типовых устройств электроники: выпрямителями, сглаживающими фильтрами, стабилизаторами, усилителями низкой частоты, генераторами гармонических колебаний, реле. А в завершении главы сможете ответить на вопросы для самотестирования. Теперь вы ПОДГОТОВЛЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИК! Поздравляю!*

### 11.1. Выпрямители

#### Первое знакомство



##### **Определение.**

**Выпрямителем** называется статический преобразователь переменного тока в постоянный, который используется в ряде отраслей промышленности (транспорт, электрохимия, питание электронной аппаратуры и т. д.).

Для преобразования переменного тока в постоянный служат электрические вентили различных типов: электронные (кенотроны), полупроводниковые (германиевые, кремниевые и др.), ионные (газотроны, тиратроны и др.).

Каждый вентиль характеризуется следующими параметрами:

- ♦ амплитудой тока;
- ♦ средним значением тока;
- ♦ амплитудой обратного напряжения;
- ♦ внутренним сопротивлением.

Амплитуда тока вентиль ограничивается насыщением (кенотроны с вольфрамовым катодом) или началом разрушения катода (кенотроны с оксидированным катодом, газотроны, тиратроны).

**Среднее значение тока** определяет тепловой режим вентиля, так что повышение среднего значения тока поведет к перегреву вентиля.

**Амплитуда обратного напряжения** — это, то наибольшее напряжение, которое может быть приложено к вентилю в обратном (непроводящем) направлении, не подвергая его опасности пробоя.

**Внутреннее сопротивление** определяет потери энергии и падение напряжения в вентиле.



#### Примечание.

*Так как вольтамперная характеристика вентилях нелинейна, то внутреннее сопротивление не постоянно и чем меньше оно, тем экономичнее выпрямитель, так как меньше потери энергии в нем.*

Для выпрямления больших токов селеновые вентили соединяют параллельно, а для получения высоких напряжений — последовательно. Параллельно можно соединять вентили одной группы, вольтамперные характеристики которых совпадают, а последовательно — вентили одного класса с совпадающими обратными характеристиками.

### Схемы соединения вентилях

Вольтамперные характеристики германиевых и кремниевых вентилях имеют большой разброс и сильно меняются с изменением температуры.

Поэтому для выравнивания токов в вентилях при их параллельном соединении вводят добавочные (выравнивающие) сопротивления  $R_B$  (рис. 11.1, а), а для выравнивания обратных напряжений при последовательном соединении вентилях их шунтируют сопротивлениями  $R_{ш}$  (рис. 11.1, б).

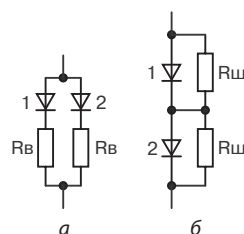


Рис. 11.1. Схемы соединения вентилях:  
а — параллельного;  
б — последовательного

В выпрямителях вентили соединяют по определенным схемам, которые создают на выходе выпрямителя напряжение с различным числом циклов выпрямления  $m$ .

Однополупериодная схема выпрямления ( $m = 1$ ) на практике почти не применяется из-за ряда существенных ее недостатков.

Двухполупериодная ( $m = 2$ ) схема выпрямления с двуханодным кенотроном изображена на рис. 11.2, а и с полупроводниковыми диодами — на рис. 11.2, б.

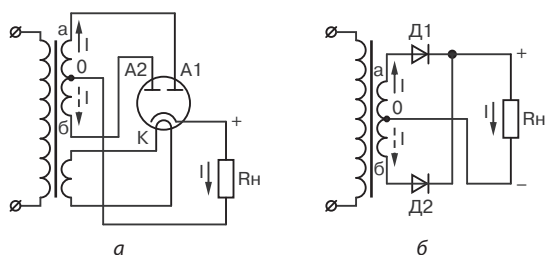


Рис. 11.2. Двухполупериодная схема выпрямления: а — кенотронного; б — полупроводникового

а через  $A_1$ -К (или диод  $D_1$ -В), сопротивление нагрузки  $R_H$  к средней точке О вторичной обмотки трансформатора.

При изменении направления ЭДС вторичной обмотки положительный потенциал имеет точка  $b$  и ток протекает от точки  $b$  через  $A_2$ -К (или диод  $D_2$ -В), сопротивление нагрузки  $R_H$  к средней точке О вторичной обмотки.

Таким образом, в нагрузке ток проходит в неизменном направлении. Вторичная обмотка трансформатора двухфазная, и каждая фаза  $a$  и  $b$  работает половину периода, ЭДС этих фаз  $u_a$  и  $u_b$  сдвинуты по фазе на половину периода (рис. 11.3, а).

Напряжение на нагрузке  $u_H$  в любой момент равно мгновенному значению ЭДС фазы, работающей в данный момент.

Кривые изменения напряжения  $u_H$  и тока  $i_H$  изображены на рис. 11.3, б. Напряжение

помимо постоянной составляющей  $U_0$  (среднее значение) содержит переменную составляющую, т. е. напряжение  $u_H$  также, как и ток  $i_H$ , не постоянны, а пульсируют.

Достоинством схемы является малое число вентилей (два вентили или один двуханодный кенотрон).

К недостаткам ее следует отнести следующее:

- ♦ наличие большой переменной составляющей напряжения (пульсация), амплитуда которой  $U_m \sim 0,67U_0$ ;
- ♦ необходимость вывода средней точки вторичной обмотки трансформатора;
- ♦ большое обратное напряжение, равное  $U_{обр} = 2U_m = 3,14U_0$ , где  $U_m$  — амплитуда ЭДС фазы вторичной обмотки ( $p = 0,67$  — коэффициент пульсации).

В часть периода, когда ЭДС вторичной обмотки направлена снизу вверх, точка  $a$  и анод вентилей  $A_1$  (или  $D_1$ ) имеют положительный потенциал, так что под действием ЭДС фазы  $a$  вторичной обмотки, ток проходит по цепи: от точки

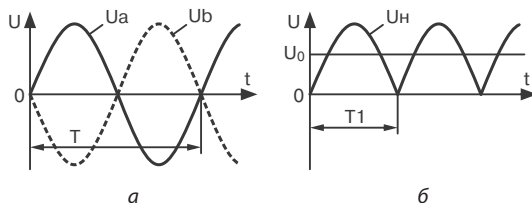


Рис. 11.3. Кривые напряжений в двухполупериодной схеме выпрямления: а — в фазах вторичной обмотки; б — на нагрузке

Период изменения напряжения на нагрузке  $T_1$  вдвое меньше периода изменения напряжения сети  $T$ . Следовательно, частота первой гармоники переменной составляющей, т. е. частота пульсации напряжения  $f_1$ , вдвое больше частоты тока сети ( $f_1 = 2f$ ).

### Однофазная мостовая схема выпрямления

Однофазная мостовая схема выпрямления (рис. 11.4) содержит четыре вентиля, к одной диагонали моста подключается вторичная обмотка трансформатора, а к другой — нагрузка  $R_H$ .

При направлении ЭДС вторичной обмотки снизу вверх точка *а* имеет положительный потенциал и ток проходит по цепи:

*вторичная обмотка трансформатора, точки а, А, диод Д1, точка Б, сопротивление нагрузки  $R_H$ , точка Г, диод Д3, точка В, точка б вторичной обмотки.*

При изменении направления ЭДС и тока во вторичной обмотке трансформатора замкнутая цепь будет:

*точки б, В, диод Д2, точка Б, сопротивление нагрузки  $R_H$ , точка Г, диод Д4, точки А и а.*

Таким образом, ток в нагрузке не изменяет направления, но изменяется по величине. Кривые изменения напряжения  $u_H$  и тока нагрузки  $i_H$  имеют такой же вид, как и в двухполупериодной схеме. Амплитуда пульсации напряжения  $U_m \sim 0,67U_0$  ( $p = 0,67$ ) при частоте ее  $f_1 = 2f$ .

В мостовой схеме нет необходимости в выводе средней точки вторичной обмотки трансформатора, она имеет меньшее, чем двухполупериодная схема, обратное напряжение  $U_{обр} = U_m = 1,57U_0$  (вместо  $3,14U_0$ ), но содержит четыре вентиля (вместо двух).

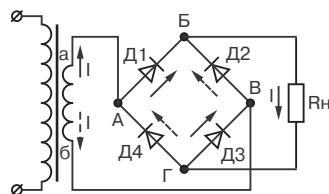


Рис. 11.4. Однофазная мостовая схема выпрямления

### Трёхфазная схема выпрямления

В трёхфазной схеме выпрямления (рис. 11.5, а) три вентиля анодами соединены с началами фаз трёхфазной вторичной обмотки. Катоды трех вентилей образуют общую точку, являющуюся плюсо-

вым полюсом на выходе выпрямителя; минусовый полюс — средняя точка вторичной обмотки. В любой момент будет открыт тот вентиль, на аноде которого напряжение наиболее положительно.

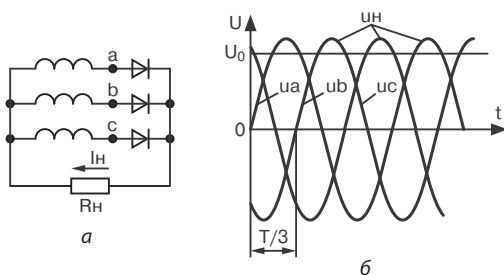


Рис. 11.5. Трехфазная схема выпрямления (а) и кривая выпрямленного напряжения (б)

Напряжения в фазах вторичной обмотки равны между собой по амплитуде и частоте, но сдвинуты по фазе на одну треть периода  $T/3$  (рис. 11.5, б). На каждом вентиле наиболее положительное напряжение будет также в течение одной трети периода  $T/3$  и напряжение на нагрузке будет представлять огибающую синусоид ЭДС в фазах вторичной обмотки.

Период изменения напряжения на нагрузке  $T_1 = T/3$ , т. е. частота пульсации

$$f_1 = 3f, \text{ а ее амплитуда } U_m \sim = 0,25U_0 \text{ (} p = 0,25 \text{)}.$$

Таким образом, амплитуда пульсации в трехфазной схеме выпрямления значительно меньше, чем в двухполупериодной и мостовой схемах, а частота пульсации больше.

Обратное напряжение на вентиле в трехфазной схеме составляет  $U_{обр} = 2,1U_0$ . Если в выпрямителях использовать управляемые вентили, то можно будет регулировать выходное напряжение на нагрузке.

**Неуправляемый вентиль** открывается, если на аноде его потенциал выше потенциала катода.

Управляемый же вентиль будет оставаться закрытым при положительном потенциале анода, если на его управляющем электроде нет отпирающего напряжения.

### Кривые регулируемого выпрямленного напряжения

Если в какой-либо схеме выпрямления, например, трехфазной (рис. 11.5, а), вместо диодов в каждую фазу включить управляемые вентили (например, тиристоры) и менять моменты их открывания, то выпрямленное напряжение будет изменяться.

**Определение.**

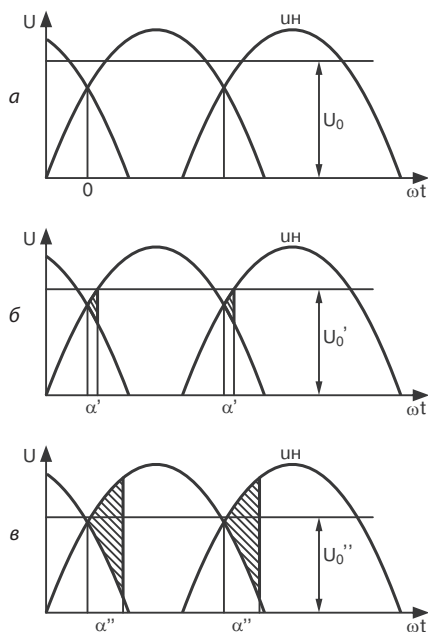
Часть периода, в течение которой вентиль остается закрытым, несмотря на то, что анод его имеет положительный потенциал, называется **углом регулирования  $\alpha$** .

При отсутствии регулирования  $\alpha = 0$  каждый вентиль открывается в момент, когда потенциал анода его положителен, и кривая выпрямленного напряжения будет такой же, как и для неуправляемого выпрямителя (рис. 11.6, а).

Если управляющий импульс для открытия вентиля автоматическим устройством подать с отставанием на угол  $\alpha' > 0$ , то вентиль в течение части периода  $\alpha'$  будет закрыт и выпрямленное напряжение будет равно ЭДС ранее работавшей фазы. В момент  $\omega t = \alpha'$  открывается очередной вентиль и выпрямленное напряжение становится равным ЭДС фазы, вновь вступающей в работу (рис. 11.6, б). Среднее значение выпрямленного напряжения уменьшится за 1/3 периода на величину, соответствующую заштрихованной площадке ( $U_0' < U_0$ ).

При увеличении угла регулирования  $\alpha \gg \alpha'$  (рис. 11.6, в) происходит дальнейшее уменьшение выпрямленного напряжения ( $U_0'' < U_0'$ ) и, увеличивая угол регулирования далее, можно изменять выпрямленное напряжение до нуля.

Такой способ регулирования напряжения экономичен, так как он не связан с дополнительной затратой энергии, но при регулировании сильно возрастает пульсация выходного напряжения.



**Рис. 11.6.** Кривые регулируемого выпрямленного напряжения при различных углах регулирования:

- а — при отсутствии регулирования  $\alpha = 0$ ;  
 б — при подаче управляющего импульса с отставанием на угол  $\alpha' > 0$ ;  
 в — при увеличении угла регулирования  $\alpha \gg \alpha'$

## 11.2. Сглаживающие фильтры. Стабилизаторы

### Сглаживающие фильтры

Выпрямленное напряжение при любой схеме выпрямления помимо постоянной составляющей  $U_0$  (среднее значение) содержит **переменную составляющую (пульсацию)**, амплитуда  $U_{m-}$  и частота  $f_1$  которой зависят от схемы выпрямления.

Для однополупериодной схемы выпрямления  $U_{m-} = 1,57U_0$  и  $f_1 = f$ , где  $f$  — частота тока сети.

Для всех остальных схем выпрямления

$$U_{m-} = (2/(m^2 - 1)) \times U_0 \text{ и } f_1 = mf,$$

где  $m$  — число фаз выпрямления ( $m = 2$  для двухполупериодной и мостовой схем,  $m = 3$  для трехфазной схемы и т. д.).

Пульсация напряжения оказывает вредное влияние — увеличивает потери, создает помехи и др. Поэтому выпрямленное напряжение обычно непригодно для питания потребителя и необходимо уменьшить его пульсацию, для чего устанавливают сглаживающий фильтр между выпрямителем и приемником энергии.

Степень ослабления пульсации сглаживающим фильтром определяется коэффициентом сглаживания, равным отношению амплитуд переменных составляющих напряжений на входе и выходе фильтра, т. е.

$$q = U_{m-вх} / U_{m-вых}$$

Фильтры могут быть трех типов:

- ♦ емкостные;
- ♦ индуктивные;
- ♦ индуктивно-емкостные.

В **емкостном фильтре** (рис. 11.7, а) конденсатор  $C$  включен параллельно нагрузке и напряжение на конденсаторе равно напряжению на нагрузке.

Когда напряжение вторичной обмотки трансформатора больше напряжения на нагрузке ( $u_2 > u_n$ ), клапан  $D$  открыт и через него проходит ток  $i_b$ , заряжающий конденсатор  $i_c$  и питающий нагрузку  $i_n$ , т. е.  $i_b = i_c + i_n$ . Кривая выпрямленного напряжения и тока в клапане при емкостном фильтре представлена на рис. 11.8.

При заряде конденсатора  $u_n$  повышается (рис. 11.7, а). При  $u_2 < u_n$  клапан закрывается и начинается разряд конденсатора на нагрузку. Напряжение при этом понижается.

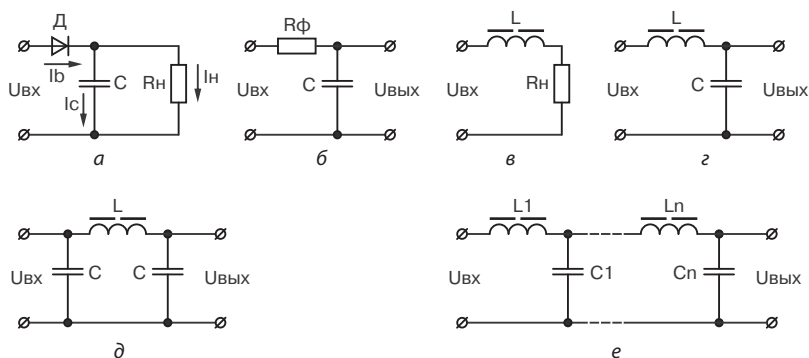


Рис. 11.7. Схемы сглаживающих фильтров:

а — емкостного; б — резисторно-емкостного; в — индуктивного; г — индуктивно-емкостного; д — П-образного; е — многосвязного индуктивно-емкостного

Для двухполупериодной схемы длительность работы фазы становится меньше половины периода и зависит как от емкости конденсатора, так и от сопротивления нагрузки. При включении конденсатора пульсация выпрямленного напряжения уменьшается и становится тем меньше, чем больше емкость конденсатора.

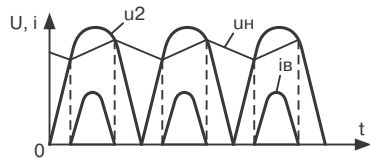


Рис. 11.8. Кривая выпрямленного напряжения и тока в вентиле при емкостном фильтре

В выпрямителях малой мощности находят применение **резисторно-емкостные RC-фильтры** (рис. 11.7, б), коэффициент сглаживания которых  $q = m\omega RC$ , где  $m$  — число фаз выпрямления,  $\omega = 2\pi f$  — угловая частота тока сети.

В индуктивных фильтрах (рис. 11.7, в) сглаживание пульсации напряжения будет лишь при индуктивном сопротивлении дросселя, много большем сопротивления нагрузки, т. е.  $m\omega L \gg R_H$ .

Индуктивно-емкостные Г-образные фильтры (рис. 11.7, г) применяются наиболее часто. Непременным условием для этих фильтров является неравенство  $m\omega L \gg 1/m\omega C$ , т. е. индуктивное сопротивление дросселя должно быть много больше емкостного сопротивления конденсатора для переменной составляющей тока.

Коэффициент сглаживания LC-фильтров

$$q = (m\omega)^2 LC - 1.$$

П-образный индуктивно-емкостный фильтр (рис. 11.7, д) можно рассматривать как двухзвенный, первое звено которого является емкостным, а второе — индуктивно-емкостным фильтром.



При очень жестких требованиях на допустимую пульсацию напряжения могут быть использованы **многозвенные сглаживающие фильтры** (рис. 11.7, *е*), коэффициент сглаживания которых равен, произведению коэффициентов сглаживания отдельных звеньев, т. е.  $q = q_1 q_2 \dots q_n$ .

### Стабилизаторы напряжения

Все потребители электрической энергии чувствительны к изменениям напряжения, т. е. требует его постоянства (стабилизации) с определенной степенью точности. В качестве параметрических стабилизаторов применяют газоразрядные и кремниевые стабилитроны.

**Газоразрядный стабилитрон**, представляющий собой прибор тлеющего разряда, имеет стеклянный баллон (рис. 11.9, *а*), заполненный смесью инертных газов аргон-неон, аргон-гелий или других газов при низком давлении.

Внутри баллона помещены два электрода — катод и анод. Вольтамперная характеристика стабилитрона (рис. 11.9, *б*) имеет такой же вид, как и любого газоразрядного прибора.

Стабилитрон характеризуется следующими величинами: напряжением стабилизации  $U_c$ , напряжением зажигания  $U_z$ , минимальным током ионизации  $I_{\min}$ , максимальным током  $I_{\max}$ , превышение которого

ведет к разрушению катода, динамическим сопротивлением на рабочем участке в диапазоне от  $I_{\min}$  до  $I_{\max}$ .

Кремниевые стабилитроны представляют собой разновидность кремниевых диодов с повышенной концентрацией носителей зарядов в полупроводниках.

Схемы включения газоразрядного и кремниевого стабилитронов изображены на (рис. 11.10, *а* и *б*).

Для кремниевых стабилитронов рабочим участком вольтамперной харак-

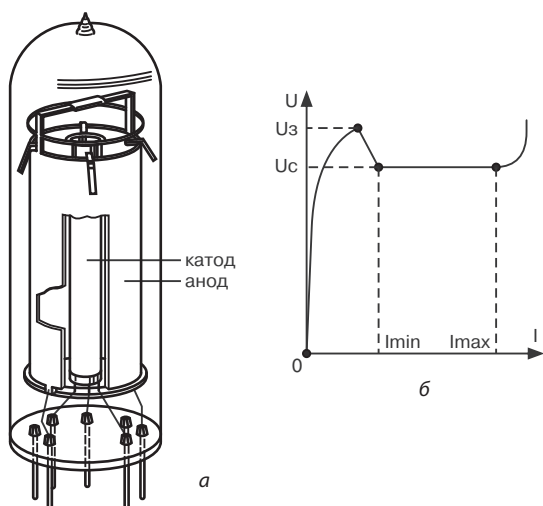
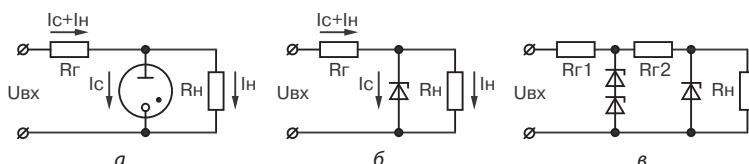


Рис. 11.9. Устройство газоразрядного стабилитрона с его условным обозначением (*а*) и его вольтамперная характеристика (*б*)



**Рис. 11.10.** Схемы включения стабилитронов:  
а — газоразрядного; б — кремниевого; в — двухкаскадного

теристики (рис. 11.11) является часть, соответствующая обратным напряжению и тока, расположенная почти параллельно оси токов в диапазоне от  $I_{\min}$  до  $I_{\max}$ .

На входе стабилизатора действует изменяющееся напряжение входа  $U_{\text{вх}}$ ; между этим напряжением и стабилитроном включено гасящее сопротивление  $R_r$ .

Так как стабилитрон включен параллельно нагрузке, то напряжение на стабилитроне  $U_c$ , равное напряжению на нагрузке  $U_H$ , можно определить следующим выражением:

$$U_c = U_H = U_{\text{вх}} - U_r,$$

где  $U_r = R_r (I_c + I_H)$  — падение напряжения в гасящем сопротивлении.

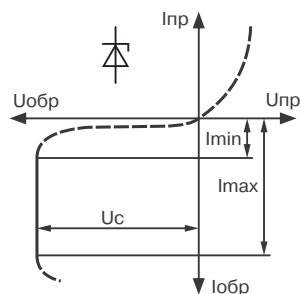
При изменении напряжения на входе  $U_{\text{вх}}$ , например, при его увеличении, в некоторой степени повысится напряжение на выходе, т. е. на стабилитроне. Это вызовет возрастание тока как в стабилитроне, так и в гасящем сопротивлении, и, следовательно, увеличится падение напряжения на этом сопротивлении.

Таким образом, при повышении напряжения на входе возрастет падение напряжения на гасящем сопротивлении, компенсируя повышение напряжения на входе стабилизатора и поддерживая постоянство напряжения на нагрузке.

Понижение напряжения на входе вызовет уменьшение падения напряжения на гасящем сопротивлении, так как ток в этом сопротивлении, как и в стабилитроне, уменьшится.

Как газоразрядные, так и кремневые стабилитроны соединяют последовательно для получения различных напряжений на нагрузке.

Параллельное соединение стабилитронов не имеет смысла, так как вследствие несовпадения их вольтамперных характеристик все парал-



**Рис. 11.11.** Вольтамперная характеристика и условное обозначение кремниевого стабилитрона

тельно включенные стабилитроны не будут работать в зоне стабилизации напряжения.

При жестких требованиях к стабильности напряжения стабилизаторы состояются из нескольких ступеней — каскадов (рис. 11.10, в), у которых коэффициент стабилизации равен произведению коэффициентов стабилизации всех звеньев стабилизатора.



#### Определение.

*Коэффициентом стабилизации стабилизатора называется отношение относительного изменения напряжения входа к относительному изменению напряжения выхода, т. е.*

$$K_{ст} = (\Delta U_{вх}/U_{вх})/(\Delta U_{вых}/U_{вых}) = (\Delta U_{вх} U_{вых})/(\Delta U_{вых} U_{вх}).$$

Стабилизаторы на стабилитронах могут иметь невысокий коэффициент стабилизации (в несколько десятков) и низкий КПД. Газоразрядные и кремниевые стабилитроны могут быть использованы для стабилизации переменного напряжения, форма кривой которого на выходе близка к прямоугольной.

## 11.3. Усилители низкой частоты

### Назначение и классификация

Электронные усилители предназначены для усиления напряжения, тока или мощности слабых электрических сигналов (колебаний). Усиление колебаний осуществляется электронной лампой или транзистором под воздействием источников энергии, питающих усилитель.

Электронные усилители можно классифицировать по ряду признаков:

- ♦ по роду усиливаемой величины — усилители напряжения, усилители тока, усилители мощности;
- ♦ по диапазону частот — усилители низкой частоты, усилители высокой частоты, усилители постоянного тока;
- ♦ по числу каскадов (ступеней) усиления — одно-, двух- и многокаскадные.

Мощность выходных колебаний усиливается в основном в связи с усилением напряжения в усилителях напряжения и усилением тока в усилителях тока и мощности.

## Основные параметры усилителей

Основными параметрами усилителей являются:

- ♦ коэффициент усиления;
- ♦ диапазон усиливаемых частот;
- ♦ выходное напряжение или выходная мощность;
- ♦ КПД.

Коэффициентом усиления усилителя напряжения называется отношение напряжения на выходе к напряжению на входе, т. е.

$$K_u = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}.$$

Коэффициентом усиления усилителя мощности называется отношение мощности на выходе к мощности на входе усилителя, т. е.

$$K_p = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}.$$

Коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления его каскадов.

По способу связи между каскадами усилители могут быть:

- ♦ с гальванической связью;
- ♦ с резистивно-емкостной связью;
- ♦ с трансформаторной связью.

В диапазоне частот усилителя изменения коэффициента усиления не должны превышать допустимых пределов.



### Определение.

**КПД усилителя** называется отношение выходной мощности усилителя к суммарной мощности питания всех его цепей, т. е.  $\eta =$

$$P_{\text{вых}}/P_{\text{пит}}.$$

## Искажения сигнала

Проходя через усилитель, форма электрического сигнала нарушается под воздействием частотных, амплитудных и фазовых **искажений**. Частотные искажения формы электрического сигнала возникают вследствие различной степени усиления напряжений различных частот, составляющих усиливаемый сигнал.

**Частотные искажения** оцениваются коэффициентом частотных искажений, показывающим, насколько усиление на данной частоте  $f$  отклоняется от усиления на средней частоте, т. е.  $M = K_{\text{ср}}/K_f$ . Обычно

допустимое значение коэффициента частотных искажений принимают  $M = 1,25$ .

**Амплитудные или нелинейные искажения** возникают вследствие нелинейности характеристик электронных ламп, транзисторов, сопротивления нагрузки и вызывают искажения формы кривых усиливаемых сигналов.

**Фазовые искажения**, представляющие собой изменения фазы электрического сигнала на выходе усилителя относительно фазы сигнала на его входе, возникают из-за реактивных элементов (индуктивностей и емкостей), включаемых в схему усилителя.

### Обратная связь

В усилителях широко используют **обратную связь**, т. е. воздействие выходной цепи усилителя на ее входную цепь. Для соединения выходной цепи усилителя с его входом служит цепь обратной связи.

Если сигнал с выхода усилителя на его вход приходит совпадающим по фазе с усиливаемым сигналом, то это увеличит общий коэффициент усиления и обратная связь называется **положительной**.

Если обратная связь вызывает уменьшение коэффициента усиления, то она называется **отрицательной**.

Отрицательная обратная связь улучшает стабильность работы и характеристики усилителя, уменьшает нелинейные искажения, так как всякая гармоника, искажающая форму сигнала, после усиления подается через цепь обратной связи на вход усилителя с противоположной фазой, частично компенсируя искажение сигнала.

### Смещение в ламповых усилителях

При использовании в качестве усилителя электронной лампы необходимо, чтобы сетка имела отрицательный потенциал относительно катода, так как при положительном потенциале на сетке возникают сеточные токи, которые искажают усиливаемый сигнал.

Для создания отрицательного смещения на сетке лампы может быть использован отдельный источник — батарея смещения, но применение такого источника увеличивает габариты, массу и стоимость устройства. Поэтому обычно применяют автоматическое смещение сеточного напряжения, которого достигают падением напряжения на резисторе  $R_{см}$  (рис. 11.12, а), включенном в цепь катода усилительной лампы.

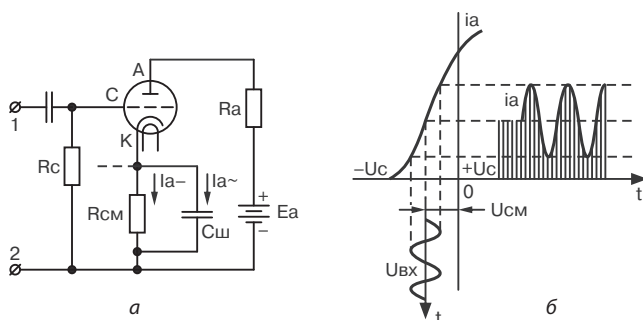


Рис. 11.12. Схема простейшего лампового усилителя (а) и процесс усиления (б)

Постоянная составляющая анодного тока  $I_a$ , проходя по этому резистору, создает падение напряжения  $U_{cm} = I_a R_{cm}$ , и потенциал сетки автоматически понижается относительно катода на величину  $U_{cm}$ .

Переменная составляющая анодного тока замыкается через шунтирующий конденсатор  $C_{ш}$ , включенный параллельно резистору  $R_{cm}$ .

Сопротивление конденсатора  $C_{ш}$  для переменной составляющей должно быть много меньше сопротивления  $R_{cm}$  с тем, чтобы падение напряжения переменной составляющей анодного тока в резисторе  $R_{cm}$  не влияло на сеточное напряжение.

Отрицательное смещение подается на сетку через резистор  $R_c$ , через который электроны, попавшие на сетку, стекают на катод. Если отключить резистор  $R_c$ , то на сетке будут скапливаться электроны, заряд которых может запереть лампу.

На зажимы резистора  $R_c$  (1 и 2) подается напряжение от источника входного сигнала  $u_{вх}$ , подлежащего усилению. Сопротивление резистора  $R_c$  должно быть достаточно большим (0,5—1 МОм) с тем, чтобы входное сопротивление схемы было стабильным.

Входное напряжение усилителя  $u_{вх}$ , приложенное к резистору  $R_c$ , включено в цепь между катодом и сеткой лампы, в результате чего изменяется отрицательное смещение на сетке.

При положительной полуволне  $u_{вх}$  отрицательное смещение на сетке лампы уменьшается — ( $U_{cm} - u_{вх}$ ) и анодный ток лампы  $i_a$  увеличивается (рис. 11.12, б).

При отрицательной полуволне  $u_{вх}$  отрицательное смещение на сетке возрастает ( $U_{cm} + u_{вх}$ ), уменьшая анодный ток лампы. Таким образом, кривые анодного тока  $i_a$  и напряжения на анодной нагрузке  $u_R$  изменяются в фазе с входным напряжением  $u_{вх}$ . При этом анодное напряжение лампы  $u_a$ , являющееся напряжением на выходе усилителя

$u_a = u_{\text{вых}} = E_a - u_R$ , изменяется в противофазе с напряжением  $u_{\text{вх}}$ . Таким образом, усилительный каскад с активной нагрузкой изменяет фазу напряжения на  $\pi$  или на  $180^\circ$ .

В рассмотренной схеме усилительного каскада весьма незначительные колебания входного напряжения  $u_{\text{вх}}$  вызывают также малые изменения потенциала сетки лампы и достаточно большие изменения анодного тока, т. е. на выходе усилителя будут получены электрические колебания значительно большей мощности.

Усиление электрических колебаний будет тем большим, чем больше крутизна анодно-сеточной характеристики лампы.

### Транзисторные усилители

Транзисторные усилители наиболее часто работают по схеме с общим эмиттером (рис. 11.13), так как эта схема обеспечивает достаточно большое входное сопротивление и коэффициент усиления. Эта

схема транзисторного усилителя эквивалентна схеме усилителя на электронной лампе.

Изменение потенциала базы под действием входного напряжения  $u_{\text{вх}}$  вызывает изменение как коллекторного тока  $i_k$ , так и напряжения эмиттер — коллектор  $u_{\text{эк}}$ , являющегося выходным.

В этой схеме коэффициенты усиления составляют:

- ♦ по току  $K_i = \beta = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}} = \Delta I_k / \Delta I_b$ ;
- ♦ по напряжению  $K_U = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta U_{\text{вх}}$ ;
- ♦ по мощности  $K_P = \Delta P_{\text{вых}} / \Delta P_{\text{вх}} = K_i K_U$ .

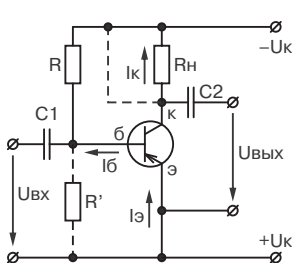


Рис. 11.13. Схема транзисторного (р-п-р) усилителя напряжения по схеме с общим эмиттером



#### Примечание.

Для нормальной работы транзистора между эмиттером и базой должно быть постоянное напряжение смещения базы (десятые доли вольта).

На рис. 11.13 для получения напряжения смещения базы применен резистор  $R$ , включенный между базой и отрицательным полюсом источника питания  $U_k$ .

Для получения напряжения смещения базы может быть использован делитель напряжения  $RR'$ , как показано на схеме прерывистой линией.

Как было сказано выше, температура в сильной степени влияет на параметры и работу полупроводниковых приборов. Так, например, повышение температуры вызывает увеличение токов и изменяет режим работы транзисторов. Для уменьшения влияния изменения температуры на режим работы транзисторов применяют температурную стабилизацию.

На схеме усилителя, приведенной на рис. 11.13, может быть использована коллекторная температурная стабилизация, если резистор  $R$ , необходимый для получения смещения напряжения базы подключить к коллектору транзистора, как показано на схеме прерывистой линией.

В этом случае повышение температуры вызовет увеличение тока коллектора  $I_k$  и возрастет падение напряжения в коллекторной нагрузке, что уменьшает напряжение эмиттер-коллектор и эмиттер-база и, следовательно, уменьшает ток коллектора  $I_k$  до начального значения.

Помимо влияния температуры отрицательным свойством транзисторов является ухудшение их усилительных свойств с повышением частоты. Неосновные носители проходят через базу не мгновенно, и инжектированные в базу в один и тот же момент неосновные носители достигают коллекторного перехода в разное время, вследствие чего уменьшается амплитуда и искажается форма выходного сигнала.

При этом происходит запаздывание по фазе между коллекторным и эмиттерным токами. Кроме того, с ростом частоты емкость коллекторного перехода шунтирует его сопротивление, что уменьшает коэффициент передачи.

По этим причинам с повышением частоты уменьшается коэффициент усиления по току  $\alpha$  и частота, при которой он достигает величины 0,707 своего начального значения, называется граничной частотой.

Если для получения заданного коэффициента усиления одного усилительного каскада недостаточно, применяют многокаскадные усилители. На рис. 11.14 показана схема двухкаскадного транзисторного усилителя с резистивно-емкостной связью между каскадами.

Разделительный конденсатор  $C_p$  предназначен для отделения постоянной составляющей

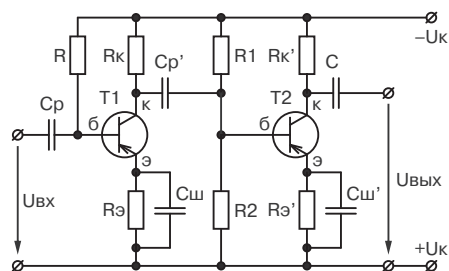


Рис. 11.14. Схема двухкаскадного транзисторного усилителя с резистивно-емкостной связью



напряжения смещения базы от источника входного напряжения. Напряжение смещения на базу первого транзистора  $T_1$  подается через резистор  $R$ .

Температурная стабилизация первого, также как второго каскада, осуществляется резисторами  $R_3$  и  $R_3'$  (эмиттерная стабилизация). Эти резисторы создают обратную связь по постоянному току.

Если с повышением температуры увеличатся токи транзисторов, то возрастет падение напряжения в резисторах  $R_3$  и  $R_3'$ , а в связи с этим понизятся потенциалы эмиттеров транзисторов, что уменьшит напряжение смещения базы и вызовет уменьшение токов.

Коллекторными нагрузками являются резисторы  $R_k$  и  $R_k'$ . Конденсатор  $C_p$  является разделительным между первым и вторым каскадами.

Второй каскад отличается от первого тем, что смещение базы фиксируется делителем напряжения с резисторами  $R_1$  и  $R_2$ .

Конденсатор  $C$  задерживает постоянную составляющую тока из коллекторной цепи в нагрузку на выходе второго каскада.

## 11.4. Генераторы гармонических колебаний

Для получения переменных токов высокой частоты могут служить ламповые генераторы, которые преобразуют энергию постоянного тока в электрическую энергию переменного тока заданной частоты.

По способу возбуждения колебаний генераторы подразделяются на генераторы с независимым возбуждением и генераторы с самовозбуждением или автогенераторы.

В генераторах с независимым возбуждением переменное напряжение заданной частоты подается от постороннего источника, и генераторы являются усилителями мощности гармонических колебаний.

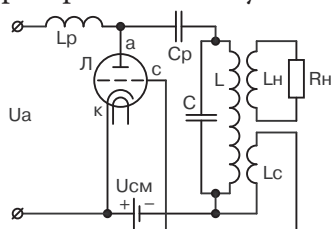


Рис. 11.15. Схема лампового генератора типа LC

В генераторах с самовозбуждением незатухающие колебания создаются под воздействием выходной цепи генератора на его входную цепь через положительную обратную связь.

На рис. 11.15 приведена схема лампового генератора с самовозбуждением, содержащая колебательный контур LC. Если заря-

дить конденсатор  $C$ , а затем замкнуть его на катушку индуктивности  $L$ , то конденсатор будет периодически разряжаться и заряжаться. При этом в цепи колебательного контура возникнут электрические колебания тока и напряжения с частотой, зависящей от емкости конденсатора  $C$  и индуктивности катушки  $L$ , т. е.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

где  $\omega_0$  — собственная угловая частота контура.

Эти колебания будут затухающими, так как в контуре происходит потеря энергии.

Для получения незатухающих колебаний переменного тока необходимо периодически с определенной частотой добавлять энергию в колебательный контур с тем, чтобы компенсировать потери энергии в нем.

Триод  $L$  является быстродействующим устройством, позволяющим добавлять в колебательный контур необходимую энергию.

Переменный ток, возникающий в колебательном контуре и проходящий по виткам катушки  $L$ , возбуждает переменное магнитное поле, которое индуцирует в обмотке  $L_c$  переменную ЭДС  $e_c$  с частотой тока колебательного контура. Эта ЭДС воздействует на сетку лампы и управляет током в цепи ее анода.

При положительном значении ЭДС катушки обратной связи она уменьшит отрицательное смещение на сетке лампы —  $(U_{cm} - e_c)$ . При этом анодный ток увеличится. При отрицательном значении ЭДС  $e_c$  увеличит отрицательное смещение на сетке лампы —  $(U_{cm} + e_c)$  и уменьшит анодный ток.

Таким образом, анодный ток лампы будет пульсирующим, изменяющимся от наибольшего до наименьшего значения с частотой, равной частоте ЭДС обмотки обратной связи, т. е. частоте тока колебательного контура.

При этом наибольшее значение анодный ток принимает в момент, когда ЭДС  $e_c$  имеет максимальное положительное значение, т. е.  $e_c$  совпадает по фазе с переменной составляющей анодного тока и, следовательно, обратная связь положительная.

Постоянная составляющая анодного тока не может пройти в колебательный контур, так как этому препятствует разделительный конденсатор  $C_p$ , и замкнется через источник питания и разделительную индуктивность  $L_p$ , которая установлена, чтобы переменная составляющая не шунтировалась источником питания.

При высокой частоте индуктивное сопротивление разделительной индуктивности  $\omega_0 L_p$  велико и оно препятствует прохождению переменной составляющей анодного тока, замыкающейся через колебательный контур.

Для возбуждения незатухающих колебаний переменная составляющая анодного тока лампы должна быть достаточной, чтобы компенсировать потери энергии в контуре.

В противном случае колебания будут затухающими и генератор работать не сможет.

В результате магнитной связи незатухающие колебания передаются в выходную обмотку  $L_n$ , откуда поступают в нагрузку  $R_n$ .

На рассмотренной схеме автогенератора между колебательным контуром и сеткой лампы использована трансформаторная обратная связь.

Автогенераторы могут быть также с индуктивной и с емкостной обратной связью.

## 11.5. Реле

В схемах питания, управления и защиты электронных устройств широко применяются реле — приборы, в которых плавное изменение входных параметров приводит к скачкообразному изменению выходных величин. Если входным параметром является величина  $X$  (например, ток), а выходным —  $Y$  (например, напряжение), то характеристика прибора, обладающего релейным эффектом, имеет вид, показанный на рис. 11.16.

При изменении входного параметра  $X$  от нуля до значения  $X_1$  выходной параметр остается неизменным и равным  $Y_1$ . При  $X = X_1$  параметр  $Y$  скачкообразно изменяется до значения  $Y_2$  и остается неизменным при дальнейшем увеличении  $X$ .

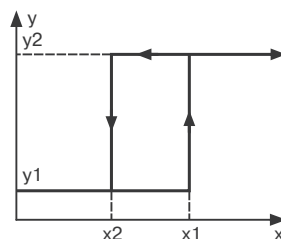
Уменьшение параметра  $X$  также не изменяет величины  $Y_2$ , но при  $X = X_2$  параметр  $Y$  скачкообразно уменьшается и принимает первоначальное значение  $Y_1$ .

Так, например, работа широко распространенного электромагнитного реле основана на электромеханическом действии тока. При увеличении тока до определенной величины сила воздействия на якорь становится достаточной для преодоления силы противодействующей пружины, и якорь изменяет свое положение, переключая контакты.

С уменьшением тока до величины, при которой электромагнитная сила становится меньше силы противодействующей пружины, якорь возвращается в исходное положение.

Таким образом, работу реле характеризуют две величины входного параметра (в рассмотренном случае тока): ток срабатывания и ток отпускания, а все промежуточные значения тока не приводят к изменению состояния реле.

Ток срабатывания реле больше тока отпускания. В рассмотренном электромагнитном реле после притяжения якоря воздушный зазор становится минимальным, для удержания якоря требуется малый ток и для отпускания реле ток в обмотке необходимо уменьшить по сравнению с током срабатывания.



**Рис. 11.16.**  
Характеристика  
релейного элемента



#### **Определение.**

*Отношение входного параметра при отпускании реле  $X_2$  к величине этого параметра при срабатывании  $X_1$  называется коэффициентом возврата реле ( $K_g = X_2/X_1$ ), который всегда меньше единицы.*

Реле состоит из воспринимающего органа, предназначенного для восприятия входного параметра, и исполнительного органа, который формирует выходные параметры. Для электромагнитного реле такими элементами являются катушка электромагнита и контакты.

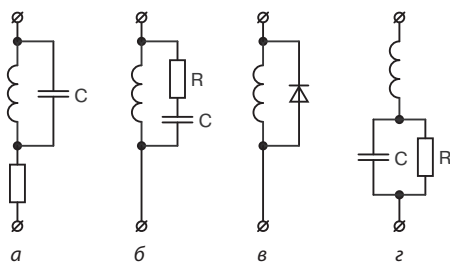
Воздействие на воспринимающий орган приводит к изменению состояния исполнительного органа через определенное время, называемое **временем срабатывания** или **временем отпускания реле**.

Время срабатывания, или отпускания, реле складывается из времени трогания и времени движения.

**Временем трогания** называется отрезок времени, прошедший от момента включения или выключения цепи воспринимающего органа до начала перемещения подвижной части реле. Это время зависит от постоянной времени реле.

**Время движения** — промежуток времени от начала перемещения подвижной части до замыкания или размыкания контактов; это время зависит от конструктивных свойств реле: массы якоря, его входа, тяговых усилий и т. д.

Время срабатывания и отпускания реле можно изменить как конструктивными, так и схемными мерами. Для замедления срабатывания и отпускания реле на его сердечнике помещают массивную медную гильзу (кольцо), которую располагают для замедления на протяжении впереди катушки (со стороны якоря), а для замедления на отпускание — сзади катушки. Индуцируемый в гильзе ток задерживает нарастание или спадание магнитного потока, в результате этого замедляется перемещение якоря.



**Рис. 11.17.** Схемы включения реле:  
 а — для замедления срабатывания и отпускания; б — для замедления отпускания (с конденсатором); в — для замедления отпускания (с включением диода параллельно обмотке реле в непроводящем направлении); г — для ускорения срабатывания

Схема включения реле для замедления срабатывания и отпускания реле показана на рис. 11.17, а. При включении конденсатор С, шунтируя обмотку реле, задерживает увеличение тока в ней, а при выключении конденсатор, разряжаясь на обмотку, замедляет уменьшение тока.

Для замедления работы реле на отпускание служит схема на отпускание служит схема (рис. 11.17, б). Запасенная в конденсаторе энергия задерживает уменьшение тока в обмотке реле. Также замедление на отпускание обеспечит схема с включением диода параллельно обмотке реле в непроводящем направлении (рис. 11.17, в).

При отключении реле в его обмотке будет поддерживаться ток под воздействием ЭДС самоиндукции. Для ускорения срабатывания реле может быть использована схема, изображенная на (рис. 11.17, г).

В момент включения ток проходит через конденсатор, представляющий для него малое сопротивление, и реле быстрее срабатывает.

Реле подразделяются на контактные и бесконтактные. Контакты реле — наиболее ненадежные их части. Бесконтактные реле имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с контактными:

- ♦ большая точность;
- ♦ повышенная чувствительность;
- ♦ увеличенное быстродействие;
- ♦ высокие надежность и долговечность.

К бесконтактным реле относятся электронные переключающие устройства, называемые **спусковыми** или **триггерами**. Контактные

реле преобразуют входную величину в механическое действие, результатом которого является замыкание или размыкание выходной цепи. К контактной группе реле относятся электромеханические реле с электронными усилителями.

Электронное реле (рис. 11.18) представляет собой электронный усилитель на триоде, в анодную цепь которого включено электромагнитное реле **Р**.

При подаче на сетку небольшого положительного напряжения от контролируемой цепи **КЦ**, подключенной к ней, анодный ток вследствие усилительных свойств лампы значительно увеличивается.

Электромагнитное реле срабатывает, переключает свои контакты и включает, отключает или переключает устройства, которыми оно управляет.

Управление электромагнитным реле может осуществляться транзисторами, тиратронами, фотоэлементами и др.

**Фотореле** является автоматическим устройством, реагирующим на изменение светового потока. Простейшее фотореле обычно последовательно соединяют с фоторезистором (рис. 11.19, а), которые включают в сеть с напряжением  $U$ .

При неосвещенном фоторезисторе сопротивление его велико (примерно 1 МОм) и ток в цепи мал. Освещение фоторезистора вызывает уменьшение его сопротивления и увеличение тока в цепи.

При некотором значении тока в цепи срабатывает электромагнитное реле **Р**, замыкая или размыкая контакты в управляемой цепи.

В случаях, когда чувствительность фотореле с фоторезисторами оказывается недостаточной, применяют фотореле с электронными усилителями (рис. 11.19, б).

При затемненном фотоэлементе его фототок равен нулю, и на сетку усилительной лампы подается отрицательное смещение  $U_{см}$ , запирающее лампу.

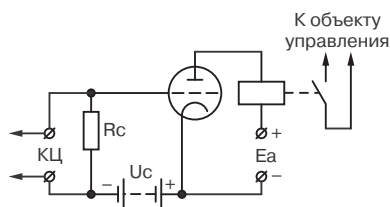


Рис. 11.18. Схема электронного реле

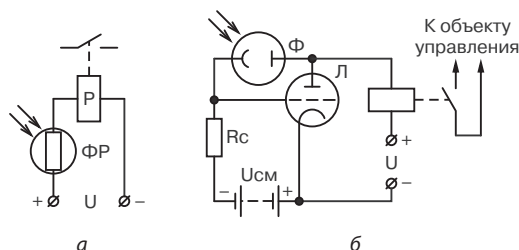


Рис. 11.19. Схемы фотореле:  
 а — с фоторезистором;  
 б — с ламповым усилителем

При освещении фотоэлемента появляется фототок, который создает на резисторе  $R_c$  падение напряжения, которое уменьшает отрицательное смещение на сетке усилительной лампы, отпирая ее.

В результате анодный ток лампы и ток в обмотке реле  $P$  повышаются. По мере увеличения освещенности фотоэлемента возрастает ток в анодной цепи и при достижении некоторого значения происходит срабатывание реле  $P$ .

## 11.6. Вопросы для тестирования

### *Вопрос №1.*

В усилительном каскаде задают напряжения и токи смещения, с целью обеспечения:

- а) ... выходного сопротивления; б) ... входного сопротивления;
- в) ... положения рабочей точки; г) ... защиты транзистора.

### *Вопрос №2.*

Для обеспечения положения рабочей точки при отсутствии входного сигнала, в усилительном каскаде на биполярном транзисторе задают следующие напряжения и токи смещения...

- а) ... токи в цепях базы и эмиттера; б) ... напряжения в цепях базы и эмиттера; в) ... токи и напряжения в цепях базы и эмиттера;
- г) ... при отсутствии входного сигнала ничего не задается.

### *Вопрос №3.*

Для связи между каскадами в многокаскадном усилителе чаще всего используют...

- а) ... соединение каскадов через конденсаторы; б) ... непосредственное соединение каскадов; в) ... соединение каскадов через резисторы;
- г) ... соединение каскадов через предохранители.

### *Вопрос №4.*

Какие величины усиливает усилитель, собранный на транзисторах по схеме с общим коллектором?

- а) Напряжение; б) напряжение и мощность; в) ток; г) ток и мощность.

**Вопрос №5.**

Какие величины усиливает усилитель, собранный на транзисторах по схеме с общим эмиттером?

а) Напряжение, ток и мощность; б) мощность; в) напряжение и ток; г) напряжение.

**Вопрос №6.**

Какой основной режим работы биполярного транзистора в усилительных устройствах?

а) Режим насыщения; б) инверсный активный режим; в) режим отсечки; г) активный режим.

**Вопрос №7.**

При какой схеме включения биполярного транзистора, усилитель называют эмиттерным повторителем?

а) С общим коллектором; б) с общей базой; в) с общим эмиттером; г) и с общим коллектором, и с общей базой.

**Вопрос №8.**

Какого назначения конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  в схеме, приведенной на рис. 11.20?

а) Гальваническая развязка по переменному току; б) положение рабочей точки при воздействии входного сигнала; в) улучшают частотные свойства каскада; г) гальваническая развязка по постоянному току.

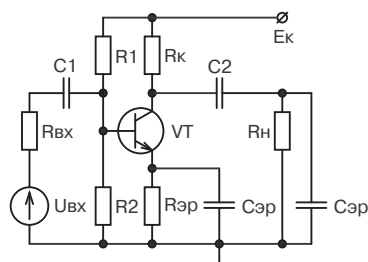


Рис. 11.20. Схема для вопросов №8 и №9

**Вопрос №9.**

Назначение резисторов  $R_1$  и  $R_2$  в схеме, приведенной на рис. 11.21?

а) Термостабилизация каскада; б) положение рабочей точки каскада; в) входное сопротивление каскада; г) выходное сопротивление каскада.

**Вопрос №10.**

Как называется промежуток времени от начала перемещения подвижной части до замыкания или размыкания контактов реле?

а) Время трогания; б) время движения; в) время срабатывания; г) время отпускания.



# ПОСЛЕСЛОВИЕ

## Куй железо пока горячо

«Куй железо пока горячо», «Не откладывай на завтра то, что можно сделать сегодня» — это народные мудрости, а значит, нет никаких причин сомневаться в истине этих слов. Веками люди ощущали на «собственной шкуре» справедливость этих выражений, независимо от того, чем они занимались: доедали мамонта в пещере или «рубили капусту» на «барахолке», сеяли рожь в степях Украины или собирали голоса на выборах и т. д.

Кроме применения этих пословиц к тем или иным событиям, оказывается значительное влияние на целые периоды в жизни человека. Отложил учебу, «положил» на работу — а жизнь-то идет.

В результате, не исключены последствия — «заглянул в рюмку», «наступил на пробку» или просто упустил время, которого не хватит потом, когда «рак свистнет» или «петух клюнет».

Вспоминая слова Павки Корчагина о том, что «нужно прожить так, чтобы не было мучительно больно за бесцельно прожитые годы», возникает вопрос:

«А как их прожить, чтобы не пожалеть?». У героя Островского вариантов было не много. Но сейчас «узкоколейки» давно построены, и возможностей проявить себя у человека более чем предостаточно. Одна из них — ваша.

Такая возможность, у каждого, появляется по-разному. Приведу свой пример той «искорки», возникшей еще в детстве.

Дружил с мальчиком — были соседями, жили в одном доме. Папа, у Андрея, работал по радиотехнической специальности и постоянно приносил какие-то запчасти, радиодетали — развивал интерес своего ребенка к радиотехнике, и довольно успешно. Андрей стал осваивать азы этой науки. Происходящее рядом, не могло не заинтересовать и меня, хотя больших успехов в то время я не достиг, — учителя то не было.

Помню, лазили возле мусорных куч и собирали выброшенные радиоприемники, проигрыватели и все то, на чем просматривались блестящие конденсаторы и цветные резисторы. Кое-чему я научился у Андрея, знал, как выглядят и как называются разноцветные штучки.

Когда друг общался с отцом по причинам неисправностей собранных им схем, я находился в недоумении, так как ничего не мог понять, о чем они говорят и на каком языке.

Интерес проявлялся еще с большей силой. Но в виду того, что самому изучить хотя бы простенькую часть науки об электричестве мне было не по силам (пытался читать журналы и учебники), я бросил это занятие и, — надолго. Дальше был пробел, о котором сейчас с сожалением вспоминаю.

Шло время, наступил момент выбора будущей профессии. Интереса, как такового, ни к чему не было.

При рассмотрении вариантов, взгляд «упал» на электромеханическое отделение училища. Было решено, но закончился «набор» и пришлось пойти учеником электро-радиомонтажника на завод, до следующего учебного года.

Работая в коллективе, я понял, что овладеть знаниями электротехники и электроники можно только тогда, когда информация берется не только из книги, а из примеров и рассуждений людей, знающих свое дело и имеющих опыт работы в этих областях.

Особенно хорошо усваивались такие вещи, которые увидел в практическом применении, а потом сопоставил и сравнил с их описаниями в учебных пособиях.

Вот таким образом постепенно вливался в процесс изучения и, делая успехи, шаг за шагом, начинал обретать уверенность в себе, ставил цели, которые в скором времени были достигнуты.

Так вот, если взять и выбрать полезную информацию из практики и связать с теорией, то получится как раз то, что так не хватало, при знакомстве с наукой на мусорных кучах, а также при попытках прочесть непонятные журналы и учебники. Допустим, что информация собрана. Для заинтересованных людей — это короткий путь к успеху.

А как привлечь внимание тех, кто еще не знает, о том, что он родился с «мультиметром» в руках или с законом Ома в голове?

Больно смотреть на слонявшихся по улицам молодых людей, упускающих свое время и, пока еще не ведающих, что их ждет впереди. Больно, потому что, многие из них просто не могут определиться со своим местом под солнцем, плывут по течению и будут плыть до момента «просветления», когда уже придется о многом пожалеть.

Вокруг нас столько всего познавательного, того, что дано только человеку. Любая область, созданная природой или людьми, имеет свои особенности и полезности, нужные и интересные для нас.

Самое, наверно, трудное — сделать первый шаг, а потом, вникая в смысл той или иной небольшой части узнанного, желание — знать больше, не прекращается. В этом и заключается вся прелесть познавательного процесса. И поэтому, для тех, кто не может «найти» свое место, могу предложить «беспролетный» вариант. Попробуйте себя в окружении интересных электрических законов, здесь вам — и всегда востребованная специальность, и творчество, и уважение окружающих вас людей.

Если вы решились, то значит для вас «рак уже свистнул» и не откладывайте «на потом», «чтобы не было больно за бесцельно прожитые годы».

### **В среде электротехнического персонала**

В среде электротехнического персонала, как и в других профессиях всегда имеет место невидимое распределение специалистов по «статусу...» — общему показателю теоретических знаний, опыту и общению с людьми. Это такой невидимый и независимый от занимаемой должности и образования, показатель.

Уважение, авторитет, репутация — как хотите, только в более скрытой форме. Причем, не имеет значение, какое учебное заведение за плечами — средняя школа или МГУ. (Вы не видели самоучек-гениев?)

Это можно представить себе в виде лестницы, на ступеньках которой расположены представители профессии. На ступени они располагаются по «статусу...».

Для перехода на новую ступень важно качественно пройти предыдущий уровень. Несоблюдение этого условия чревато «казусными» ситуациями.

К примеру, руководитель одного из подразделений крупного предприятия, занял свое место (прыгнул через «ступеньку»), благодаря, протекже высокопоставленного родственника, не имея для этого соответствующего опыта работы и самое главное — знаний, необходимых для этого профиля.

В результате, проработал он недолго — не прошел ближайшей аттестации, проводимой независимой экспертизой.

### **«Роковой» вопрос — электромагнитный пускатель**

Еще пример.

Обыкновенный парень, таких миллион, после окончания средней школы устроился учеником электрика на предприятии для того, чтобы «перекантоваться» годик, перед тем, как отдать долг Отечеству.

Вроде бы понравилось.

Хотя каждый рабочий день был занят одной мыслью: — «Скорее 5 часов — там девчонки, пиво, танцуйки и т. д.». Вот она — слабость. В рабочее время — удели внимание делу, которое нравится.

Пролетел год. Армия. После службы — устройство на работу, связанную с электричеством. Собеседование...

Место работы оказалось довольно престижным, высокооплачиваемым и перспективным (полный соц. пакет, направление на оплачиваемую учебу и т. д.).

На собеседовании прозвучал всего один — единственный, простой вопрос, решающий судьбу молодого человека.

И он не смог...

Он не смог изобразить на листке бумаги схему электромагнитного пускателя электродвигателя. Схему, которую любой электрик должен знать, в первую очередь, днем и ночью.

Ему это было непростительно. Самая первая и важная «ступенька» будущей работы, да и в самой жизни — сорвалась. Не попал даже в последние ряды первой «ступени», не говоря уже о «статусе...».

Так происходит со многими.

### **Электротехника — область творчества**

Только образование, накопленный опыт работы, заработанное уважение позволяют постепенно продвигаться по «лестнице успеха».

Особое внимание хочется обратить на людей, стоящих в последних рядах каждой ступени. Часто эти люди, незаметные в своем профессиональном отношении к работе.

Ведь электротехника — это область творчества и здесь обязательны некие нестандартные проявления или «форсы» на фоне «рутины» рабочей обстановки.

Они будут «пожизненно» последними на своей ступени, если не будут развивать в себе творческую жилку, пополнять запас теоретических знаний и стремиться овладеть, насколько это, возможно, своей великолепной профессией.

### Электромагнитный пускатель на «лестнице успеха»

В истории обыкновенного паренька необходимо обратить внимание на очень важный момент собеседования, это вопрос о работе электромагнитного пускателя. Нарисовать схему и объяснить работу — это очень простой и эффективный способ показать свои знания и навыки.

В самом деле! Здесь проверяется способность чтения схем и логика мышления. Также, знание элементов и их свойств. Здесь можно продемонстрировать почти все законы электротехники. Вся электротехника на одном листе!

Человек, с легкостью объясняющий работу схемы и назначение элементов, совсем не кажется «чайником» в этой области.

Поэтому, те, кто пока еще, находится на нижних ступенях и не имеет «статуса...», применяйте в пополнении своего опыта и знаний такие методы, как объяснение работы и назначение элементов отдельных устройств силовой электротехники, автоматики, бытовой электротехники.

Это, само по себе, интересное занятие, никак не может быть в тягость человеку, который не стоит на месте и любит свою работу.

Для того чтобы попытаться начать по-новому относиться к своей электротехнической профессии и, если вы еще не знаете, как это сделать, то почитайте демонстрацию работы схемы электромагнитного пускателя.

Может, это натолкнет вас на мысль о том, как, использовать и другие подобные примеры, содержащие электротехническую информацию, которая послужит вам в повышении своего «статуса...» на невидимой «лестнице успеха».

Рассмотрим общий принцип работы магнитного пускателя, который служит для управления включения-выключения разных потребителей. Схема пускателя может состоять от нескольких до большого количества элементов в зависимости от сложности схем управления. Начнем с минимального количества, самая простая схема магнитного пускателя (рис. 1).

В данной схеме минимальное количество элементов: это предохранители для защиты цепи управления; системы кнопок и контакта, которые являются по сути своей кроме своих основных функций системой «нулевой защиты» от повторного включения, при исчезновении

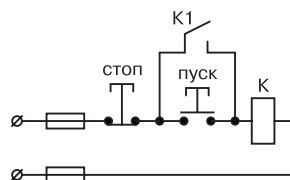


Рис. 1. Простая схема магнитного пускателя

напряжения при работе. Рассмотрим работу этой схемы. Ток проходит по предохранителю через замкнутую кнопку «Стоп», через нажатую кнопку «Пуск», через обмотку катушки контактора по цепи через второй предохранитель и в сеть. Итак, при нажатии на кнопку «Пуск» цепь замыкается, катушка контактора втягивается и замыкает свои главные контакты. Допустим, если нагрузка у нас электродвигатель, то в цепи электродвигателя стоят контакты нашего контактора и во время срабатывания катушки она втягивается и замыкает эти контакты (рис. 2).

При этом цепь питания электродвигателя замкнута на трехфазную сеть и электродвигатель начинает работать. Также при срабатывании катушки контактора — замыкается блок-контакт этого контактора для шунтирования кнопки «Пуск». Т. е. когда мы кнопку отпустим, у нас цепь остается замкнутой и контактор остается во включенном положении, при этом двигатель продолжает работать (рис. 3). Если в сети пропадает напряжение (рис. 4), то катушка контактора обесточивается, возвращается на свое исходное место, у нее размыкаются главные контакты, размыкается блок-контакт и, т. к. напряжения нет, схема находится в бездействии. При появлении напряжения в сети повторного включения электродвигателя не произойдет, т. к. контакт блокировочный у нас замкнут и для повторного запуска необходимо опять нажать кнопку «Пуск».

Итак, мы рассмотрели самый обязательный момент в работе магнитного пускателя: эта система, состоящая из кнопок основного запуска и помимо этого являющейся системой «нулевой защиты». Схемы управления могут получать питание как от двухфазного переменного тока, от которого работает наша нагрузка (рис. 5), также и от однофазного: если мы берем один конец из фазы, а другой на 0 (рис. 6).

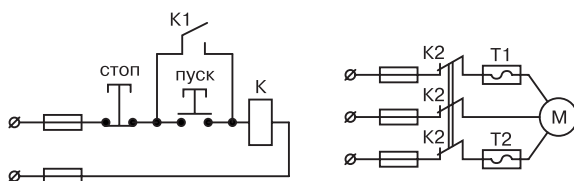


Рис. 2. Включение в цепь питания электродвигателя

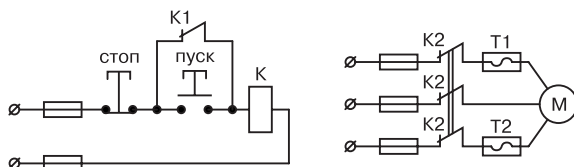


Рис. 3. Шунтирование кнопки «Пуск»

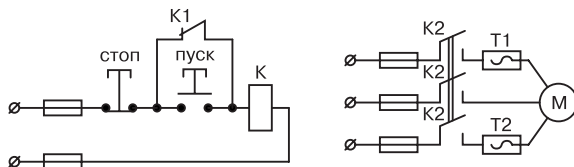


Рис. 4. Схема — в бездействии

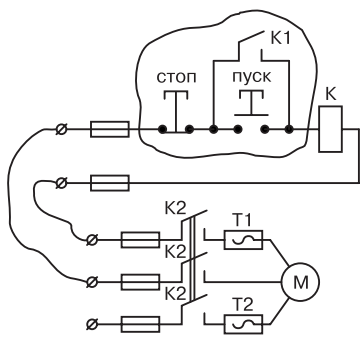


Рис. 5. Питание от двухфазного переменного тока

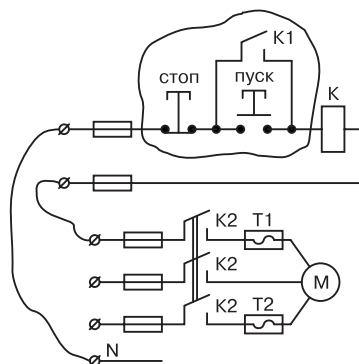


Рис. 6. Питание от однофазного переменного тока

В первом случае напряжение питания в катушке контактора будет равно линейному напряжению; во втором случае катушка контактора должна быть на напряжении, равном фазному. Т. е. если сеть у нас 380 В, то в первом случае катушка должна быть на напряжении 380 В, во втором — на напряжении 220 В.

Помимо основных кнопок и контактов обычно в цепи управления магнитного пускателя присутствуют дополнительные элементы управления и защиты. На нашей схеме силовой цепи мы видим обмотки теплового реле, которые имеют свои контакты. Эти контакты служат для защиты электродвигателя от перегрузки и имеют свои контакты, которые устанавливаются в цепи управления включения этого электродвигателя, т. е. в эту цепь в катушке контактора (рис. 7).

Первый контакт — это замкнутый контакт теплового реле Т1; второй — Т2. Обычно они являются нормально замкнутыми или,

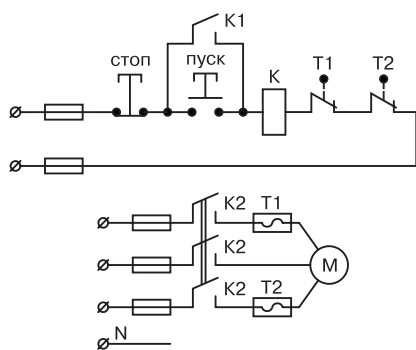


Рис. 7. Замкнутые контакты теплового реле

можно сказать, замкнутыми по умолчанию. При перегрузке электродвигателя ток в обмотке Т1 (если ток повысился в этой обмотке электродвигателя), или возрос ток Т1Т2(если перегрузка на этой обмотке), или повысился ток в другой обмотке электродвигателя, то повысится ток в тепловом реле Т2, то при этом в любом случае перегрузки электродвигателя хотя бы одно реле разомкнет свой контакт.



При этом разомкнется цепь управления, катушка контактора вернется в исходное положение, разомкнет свои главные контакты, и электродвигатель остановится.

Также, кроме элементов защиты в цепи управления могут присутствовать элементы управления по назначению работы нагрузки.

Рассмотрим еще три элемента, которые могут находиться в цепи управления (рис. 8). Первый элемент — уровень, т. е. в цепь управления может устанавливаться датчики уровней; второй — может устанавливаться датчик температуры, в зависимости от которой будет работать схема; третий — может устанавливаться конечный выключатель (путевой), т. е. микровыключатель, который работает от механического воздействия.

Например, если мы имеем насос для закачки в какую-либо емкость, то наверху емкости стоит датчик верхнего уровня аварийный для того, чтобы не перекачать выше определенного уровня. Так вот, для закачки воды нажимаем на кнопку «Пуск», ток проходит по катушке через все замкнутые контакты схемы, включает катушку, катушка в свое время включает контакты электродвигателя насоса и свой блокировочный контакт. Нанос начинает качать воду. Кнопку «Пуск» мы отпускаем, электродвигатель продолжает работать. При достижении верхнего уровня (допустим, стоит поплавков с микровыключателем) вода доходит до поплавка, поплавки поднимаются, тем самым размыкает контакт на микровыключателе (рис. 9). Цепь катушки прерывается, отключаются главные контакты и блок-контакт, и двигатель останавливается.

Для контроля температуры всей этой нашей силовой системы, состоящей, допустим, из вентилятора и нагревательных элементов, т.е какой-то воздушный теплонагреватель (калорифер), у нас будет необходим контакт или автоматической работы, или для защиты от перегрева нагревательных элементов при ручном управлении. Т. е. все равно у нас должен присутствовать температурный контакт цепи управления. Запускаем наш калорифер (рис. 10), ток пошел по катушке контактора, контактор включает свои главные контакты, замыкает блок-контакт, отпускаем кнопку «Пуск».

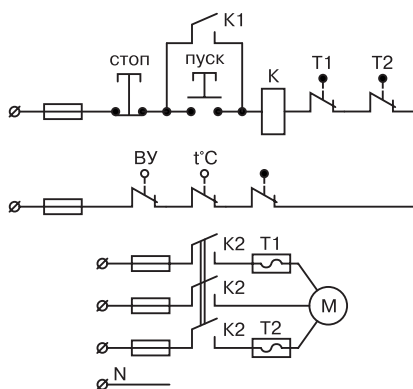


Рис. 8. Элементы, которые могут находиться в цепи управления



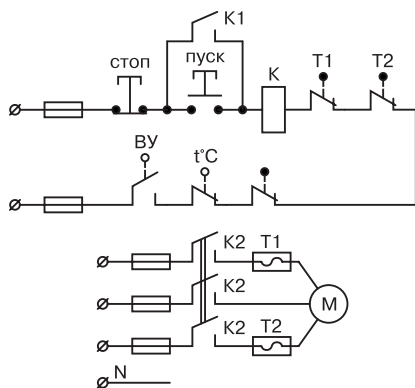


Рис. 9. Контакт на микровыключателе разомкнут

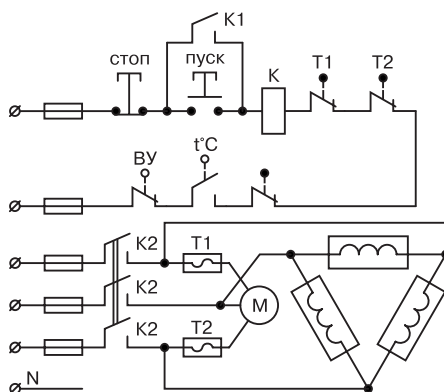


Рис. 10. Калорифер

При замыкании главных контактов у нас заработал электродвигатель вентилятора, и включились элементы нагрева. При этом начала повышаться температура. Датчик температуры у нас пока в замкнутом состоянии, допустим, настроен на температуру 70°C. Как только температура достигла таких пределов, т. е. если у нас ручное управление, и мы забыли выключить, то датчик температуры разрывает цепь, контактор размыкает свои главные контакты и блок-контакт, и наш потребитель от сети отключается.

Это самый простой пример пускателя, более сложные состоят из большего количества элементов, контакторов, промежуточных реле. Думаю, ничего сложного по схеме работы магнитных пускателей такого типа ручного режима нет и в процессе усложнения таких схем управления их можно будет понимать самостоятельно.

Р. S.

Если вы не разбираетесь в работе некоторых элементов, слабоваты в чтении схем или, вообще, боитесь на них смотреть, то найдите в себе силы и попробуйте детально разобраться и выучить, хотя бы одну. Затем продемонстрируйте свои знания, в рамках этой схемы, коллегам. Если что-то не понятно, у них же и спросите.

Если все получится, то, конечно, вы ощутите радость и уверенность в себе.

## ОТВЕТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ

**Первый шаг.** Ответы на ТЕСТ по теме: «Проводники. Диэлектрики. Емкость. Закон Ома»

№1 — в; №2 — б; №3 — б; №4 — а; №5 — а; №6 — а; №7 — в; №8 — б; №9 — в; №10 — г; №11 — в; №12 — в; №13 — г; №14 — б; №15 — б; №16 — а; №17 — г; №18 — б; №19 — б; №20 — г.

**Второй шаг.** Ответы на ТЕСТ по теме: «Соединение сопротивлений. Закон Ома. Электрические цепи. Мощность»

№1 — б; №2 — а; №3 — г; №4 — г; №5 — в; №6 — б; №7 — б; №8 — в; №9 — а; №10 — в; №11 — б; №12 — в; №13 — а; №14 — б; №15 — г; №16 — в; №17 — а; №18 — б; №19 — в; №20 — а.

**Третий шаг.** Ответы на ТЕСТ по теме: «Магнетизм и электромагнетизм»

№1 — в; №2 — в; №3 — а; №4 — г; №5 — в; №6 — в; №7 — г; №8 — г; №9 — б; №10 — в.

**Четвертый шаг.** Ответы на ТЕСТ по теме: «Переменный ток и цепи переменного тока»

№1 — г; №2 — а; №3 — в; №4 — г; №5 — б; №6 — а; №7 — г; №8 — а; №9 — б; №10 — в.

**Пятый шаг.** Ответы на ТЕСТ по теме: «Трехфазный переменный ток»

№1 — б; №2 — б; №3 — б; №4 — в; №5 — в; №6 — б; №7 — а; №8 — в; №9 — а; №10 — в.

**Шестой шаг.** Ответы на ТЕСТ по теме: «Трансформаторы»

№1 — г; №2 — г; №3 — б; №4 — в; №5 — а; №6 — а; №7 — в; №8 — а; №9 — в; №10 — г.

**Седьмой шаг.** Ответы на ТЕСТ по теме: «Асинхронные двигатели»

№1 — а; №2 — б; №3 — в; №4 — а; №5 — в; №6 — г; №7 — б; №8 — а; №9 — б; №10 — в.

**Восьмой шаг.** Ответы на ТЕСТ по теме: «Синхронные машины»

№1 — б; №2 — в; №3 — г; №4 — г; №5 — г; №6 — б; №7 — а; №8 — а; №9 — б; №10 — в.

**Девятый шаг.** Ответы на ТЕСТ по теме: «Машины постоянного тока»

№1 — а; №2 — а; №3 — г; №4 — б; №5 — а; №6 — в; №7 — г; №8 — б; №9 — в; №10 — б.

**Десятый шаг.** Ответы на ТЕСТ по теме: «Полупроводниковые приборы»

№1 — в; №2 — б; №3 — а; №4 — г; №5 — в; №6 — а; №7 — в; №8 — г; №9 — а; №10 — в.

**Одиннадцатый шаг.** Ответы на ТЕСТ по теме: «Устройства электроники»

№1 — в; №2 — в; №3 — а; №4 — г; №5 — а; №6 — а; №7 — а; №8 — г; №9 — б; №10 — б.

## НА ВЕБ-СТРАНИЦАХ

На основе данной книги создан мультимедийный диск на котором темы раскрываются с помощью анимации, видеороликов и подкастов.

Некоторые видеоролики можно скачать и просмотреть на страницах авторского сайта «Электрокласс» ([www.eleczon.ru](http://www.eleczon.ru)) в разделе «Основы электротехники и электроники» ([www.eleczon.ru/ucheba/osnovi.html](http://www.eleczon.ru/ucheba/osnovi.html)), они помогут в освоении материала самоучителя.

Сайт мультимедийного диска «В мир электричества — как в первый раз!» находится по адресу: [www.eltray.com](http://www.eltray.com).

Есть мультимедийное продолжение изучения материала также на DVD-диске по адресу: [www.eltray.com/in\\_world2.php](http://www.eltray.com/in_world2.php)

А также существует электронное издание «История изучения электричества». Первая часть — предыстория описаний и открытий, до появления работ Вольты и Гальвани, которые вызвали у человечества интерес к электричеству, и получили первый искусственный источник питания — «вольтов столб». В последующих пяти частях рассказывается о тех законах, на которых основано электричество, о великих экспериментах, повлекших появление понятия «электротехника». Здесь, рядом с описаниями основных законов, герои истории электричества — Кулон, Ом, Кирхгоф, Ленц... Существует много книг, где о судьбах великих изобретателей и ученых рассказано намного подробнее. Это же издание — не о судьбах замечательных людей и не о биографии ученых-физиков, его тема — конкретные практические действия и открытия именно в направлении электротехники.

Этот материал поможет заполнить некоторые пробелы и окажется интересен и школьникам, и их родителям, и учителям и, конечно же, всем тем, кто связал свою жизнь с покорением самого интересного и загадочного явления природы ([www.electricity-history.ru/](http://www.electricity-history.ru/)).

Выбрать интересующий Вас ресурс можно на веб-странице по адресу: [www.eltray.com/vipusk-akcia-afterespond-povtor.php](http://www.eltray.com/vipusk-akcia-afterespond-povtor.php)





# >> Книжный магазин

издательства «Наука и Техника»  
приглашает за покупками

...> **Предлагаем широкий ассортимент  
технической литературы ведущих  
издательств (более 2000 наименований):**

- Компьютерная литература
- Радиоэлектроника
- Телекоммуникации и связь
- Транспорт, строительство
- Научно-популярная медицина,  
педагогика, психология

...> **Чем привлекателен наш магазин:**

- низкие цены;
- ежедневное пополнение ассортимента;
- поиск книг под заказ;
- обслуживание за наличный  
и безналичный расчет;
- гибкая система скидок;
- комплектование библиотек;
- обеспечение школ учебниками  
по информатике;
- возможна доставка.

**Наш адрес:** г. Санкт-Петербург  
пр. Обуховской Обороны д. 107  
ст. метро Елизаровская

**Справки о наличии книг по тел. 412-70-25**

**E-mail: [admin@nit.com.ru](mailto:admin@nit.com.ru)**  
(рассылка ассортиментного прайс-листа по запросу)

Мы работаем с 10 до 19 часов без обеда и выходных  
(в субботу и воскресенье до 18 час)

**Уважаемые господа!**  
**Книги издательства «Наука и Техника»**

Вы можете заказать наложенным платежом  
в наших интернет-магазинах

**www.nit.com.ru, www.nit-kiev.com**

а также приобрести

➤ **в крупнейших магазинах г. Москвы:**

ТД «БИБЛИО-ГЛОБУС»	ул. Мясницкая, д. 6/3, стр. 1, ст. М «Лубянка»	тел. (495) 781-19-00, 624-46-80
Московский Дом Книги,	ул.Новый Арбат, 8, ст. М «Арбатская», «ДК на Новом Арбате»	тел. (495) 789-35-91
Московский Дом Книги,	Ленинский пр., д. 40, ст. М «Ленинский пр.», «Дом технической книги»	тел. (499) 137-60-19
Московский Дом Книги,	Комсомольский пр., д. 25, ст. М «Фрунзенская», «Дом медицинской книги»	тел. (499) 245-39-27
Дом книги «Молодая гвардия»	ул. Б. Полянка, д. 28, стр. 1, ст. М «Полянка»	тел. (499) 238-50-01
Сеть магазинов «Новый книжный»	тел. (495) 937-85-81, (499) 177-22-11	

➤ **в крупнейших магазинах г. Санкт-Петербурга:**

Санкт-Петербургский Дом Книги	Невский пр. 28 тел. (812) 448-23-57
«Энергия»	Московский пр. 57 тел. (812) 373-01-47
«Аристотель»	ул. А. Дундича 36, корп. 1 тел. (812) 778-00-95
Сеть магазинов «Книжный Дом»	тел. (812) 559-98-28

➤ **в регионах России:**

г. Воронеж, пл. Ленина д. 4	«Амитель»	(4732) 24-24-90
г. Екатеринбург, ул. Антона Валека д. 12	«Дом книги»	(343) 253-50-10
г. Екатеринбург	Сеть магазинов «100 000 книг на Декабристов»	(343) 353-09-40
г. Нижний Новгород, ул. Советская д. 14	«Дом книги»	(831) 277-52-07
г. Смоленск, ул. Октябрьской революции д. 13	«Кругозор»	(4812) 65-86-65
г. Челябинск, ул. Монакова, д. 31	«Техническая книга»	(904) 972 50 04
г. Хабаровск	Сеть книжно-канцелярских магазинов фирмы «Мирс»	(4212) 26-87-30

➤ **и на Украине (оптом и в розницу) через представительство издательства**

**www.nit-kiev.com**

e-mail: nitkiev@gmail.com

**Мы рады сотрудничеству с Вами!**