

Общепрофессиональные  
дисциплины



Г. В. Ярочкина

# ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Начальное профессиональное образование

Учебное пособие



УДК 621.3(075.32)  
ББК 31.2я722  
Я 769

Рецензенты:

преподаватель ГБОУ СПО «Политехнический колледж № 13» С. С. Костенкова,  
председатель ПЦК общетехнических дисциплин, преподаватель математики  
и автоматизации ГБОУ СПО «Строительный колледж № 26» Г. Г. Хрящева

**Ярочкина Г. В.**

Я 769 Основы электротехники : учеб. пособие для учреждений  
нач. проф. образования / Г. В. Ярочкина. — М. : Изда-  
тельский центр «Академия», 2013. — 240 с.

ISBN 978-5-7695-9151-8

Даны основные понятия электростатики, рассмотрены цепи постоянного и переменного тока, трехфазные и магнитные цепи. Приведены сведения об электрических измерениях и электроизмерительных приборах, а также об электрических аппаратах, в том числе трансформаторах, электрических машинах. Изложены принципы передачи и распределения электрической энергии.

Учебное пособие создано в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом по общепрофессиональной дисциплине «Основы электротехники» для профессий технического профиля.

Для учащихся учреждений начального профессионального образования. Может быть рекомендовано для обучающихся по неэлектрическим специальностям систем среднего профессионального образования.

Условные обозначения:

 — компетенции

 — контрольные вопросы

 — практические задания

 — темы докладов и рефератов

 — определения

 — запомните

УДК 621.3(075.32)  
ББК 31.2я722

*Оригинал-макет данного издания является собственностью  
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение  
любым способом без согласия правообладателя запрещается*

© Ярочкина Г. В., 2013

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2013

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2013

ISBN 978-5-7695-9151-8

## УВАЖАЕМЫЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Данное учебное пособие является частью учебно-методического комплекта по общепрофессиональной дисциплине «Основы электротехники».

Учебно-методические комплекты нового поколения включают традиционные и инновационные учебные материалы, позволяющие обеспечить изучение общеобразовательных и общепрофессиональных дисциплин и модулей. Каждый комплект содержит в себе учебники и учебные пособия, средства обучения и контроля, необходимые для освоения общих и профессиональных компетенций, в том числе и с учетом требований работодателя.

Учебные издания дополняются электронными образовательными ресурсами. Электронные ресурсы содержат теоретические и практические модули с интерактивными упражнениями и тренажерами, мультимедийные объекты, ссылки на дополнительные материалы и ресурсы в Интернете. В них включен терминологический словарь и электронный журнал, в котором фиксируются основные параметры учебного процесса: время работы, результат выполнения контрольных и практических заданий. Электронные ресурсы легко встраиваются в учебный процесс и могут быть адаптированы к различным учебным программам.

Учебно-методический комплект разработан на основании Федерального государственного образовательного стандарта начального профессионального образования с учетом его профиля.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

«Электротехника» является общепрофессиональной учебной дисциплиной для учащихся по профессиям начального профессионального образования.

Под электротехникой понимается область науки и техники, использующая электрические и магнитные явления для практических целей.

Электрическая энергия — самый распространенный вид энергии, применяемый в промышленности, сельском хозяйстве, строительстве, транспорте и в быту.

Развитие электротехники как науки позволило разработать и затем применять различные методы преобразования неэлектрических величин в электрические и создать электрические приборы для контроля, управления и автоматического регулирования любых производственных процессов. Современные успехи электротехники заключаются в использовании электрических и магнитных явлений в промышленности, медицине, экологии и других отраслях.

Учебное пособие состоит из восьми глав: «Основы электростатики», «Электрические цепи постоянного тока», «Электромагнетизм и электромагнитная индукция», «Электрические цепи переменного тока», «Электрические измерения и электроизмерительные приборы», «Трансформаторы», «Электрические машины» и «Производство, распределение и потребление электрической энергии».

В начале каждой главы приведены требования к умениям и знаниям, которыми должны овладеть учащиеся по окончании ее изучения.

Содержание учебного пособия базируется на современных достижениях электроэнергетики и имеет практико-ориентированную направленность. Решения типовых задач, контрольные вопросы и практические задания приведены для организации самостоятельной работы. Предлагаемые темы рефератов рекомендуются для использования учащимися в качестве внеаудиторной самостоятельной работы.

В учебном пособии выполнены выделения, которые помогают структурировать учебный материал и облегчают его усвоение.

Настоящее учебное пособие разработано в соответствии с требованиями федеральных государственных образовательных стандартов начального профессионального образования.

# ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ

**К**

В результате изучения данной главы вы должны:

■ **уметь:**

- определять силу взаимодействия двух зарядов, напряженность электрического поля, потенциал точки электрического поля;
- рассчитывать емкость плоского конденсатора, эквивалентную (общую) емкость конденсаторов, соединенных последовательно, параллельно и смешанно;

■ **знать:**

- единицы измерения тока, электрического заряда, потенциала и напряженности электрического поля, электрической емкости;
- закон Кулона.

### 1.1.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ



**Электрическое поле** — это особый, отличный от вещества, вид материи, через которую передается действие одних заряженных тел на другие.

Электрическое поле неотделимо от заряда, существует вместе с ним и окружает его. Под действием сил электрического поля происходит взаимодействие зарядов — их взаимное притяжение и отталкивание. Электрическое поле возникает вокруг заряда в любой среде и даже в вакууме. Поле всякого заряженного тела составлено из полей, принадлежащих отдельным элементарным зарядам — электронам и протонам. Если в электрическое поле поместить пробный положительный заряд, то силы этого поля окажут на него воздействие, стремясь переместить его в определенном направлении.

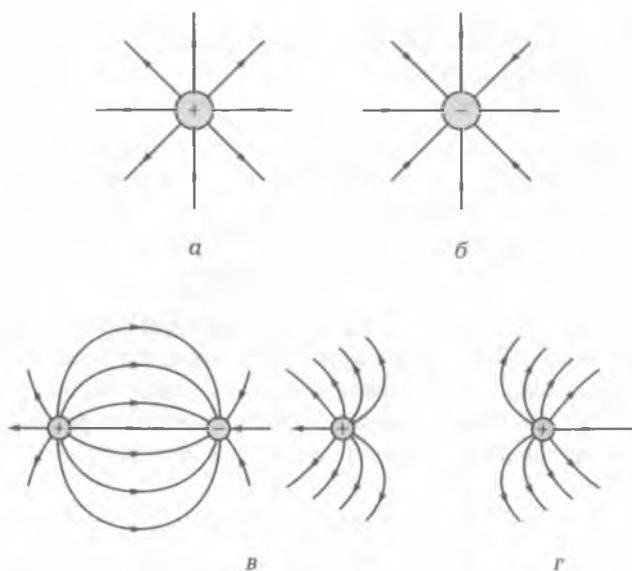


Рис. 1.1. Условное обозначение электрического поля:

*а* — положительный заряд; *б* — отрицательный заряд; *в* — два разноименных заряда; *г* — одноименные заряды

Линия, по которой будет перемещаться пробный положительный заряд под действием сил электрического поля, называется **силовой линией**. Электрическое поле изображается с помощью силовых линий (рис. 1.1).

Электрическое поле, воздействующее на заряд так, что скорость движения последнего увеличивается, называется **ускоряющим электрическим полем**.

Если заставить электрический заряд двигаться навстречу действию сил поля, то энергия электрического поля будет возрастать, а скорость движения заряда уменьшаться. Такое поле называется **тормозящим электрическим полем**.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется электрическим полем?
2. Какая линия электрического поля называется силовой?
3. Какое электрическое поле называется тормозящим, а какое — ускоряющим?

## 1.2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯДОВ. ЗАКОН КУЛОНА

Электрические заряды взаимодействуют между собой, т.е. одноименные заряды взаимно отталкиваются, а разноименные притягиваются. Силы взаимодействия электрических зарядов определяются **законом Кулона** и направлены по прямой линии, соединяющей точки, в которых сосредоточены заряды.

→ Согласно закону Кулона сила взаимодействия двух точечных электрических зарядов прямо пропорциональна произведению количества электричества в этих зарядах, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и зависит от среды, в которой находятся заряды:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_a r^2},$$

где  $F$  — сила взаимодействия зарядов, Н;  $q_1, q_2$  — количество электричества каждого заряда, Кл;  $\epsilon_a$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды (материала);  $r$  — расстояние между зарядами, м.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость среды характеризует электрические свойства той среды, в которой находятся взаимодействующие заряды. В Международной системе единиц (СИ)  $\epsilon_a$  измеряется в фарадах на метр (Ф/м) и определяется по формуле

$$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon_r,$$

где  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная, равная абсолютной диэлектрической проницаемости вакуума,  $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

Таблица 1.1. Диэлектрическая проницаемость материалов

Материал	$\epsilon$	Материал	$\epsilon$
Слюда	6—7	Карболит	3,5
Фарфор	6,5	Лакоткань	3,5—3,6
Мрамор	10,1	Керосин	2,0
Бумага пропарафинированная	2,2	Стекло	5,5—10
Гетинакс	7,8	Эбонит	2,4—4,5

Величина  $\epsilon$  показывает, во сколько раз в данной среде электрические заряды взаимодействуют между собой слабее, чем в вакууме, и называется *относительной диэлектрической проницаемостью* (табл. 1.1).

**Пример 1.1.** Определить силу взаимодействия между двумя зарядами, находящимися в пустоте на расстоянии один от другого 5 см. Величина зарядов равна  $2 \cdot 10^{-8}$  и  $3 \cdot 10^{-5}$  Кл.

*Решение*

Сила взаимодействия зарядов

$$F_1 = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_a r^2} = \frac{2 \cdot 10^{-8} \cdot 3 \cdot 10^{-5}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,86 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 0,05^2} = 2,16 \text{ Н.}$$

Те же заряды, помещенные на том же расстоянии в керосин, будут взаимодействовать между собой с силой

$$F_2 = \frac{2 \cdot 10^{-8} \cdot 3 \cdot 10^{-5}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,86 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 0,05^2} = 1,08 \text{ Н,}$$

т. е. сила уменьшилась в два раза.

### **!** Запомните

Большие электрические заряды взаимодействуют сильнее, чем малые. С увеличением расстояния между зарядами сила их взаимодействия значительно слабее.

### **?** КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит суть закона Кулона? Сформулируйте его.
2. В каких единицах измеряется абсолютная диэлектрическая проницаемость среды и что она характеризует?

### **П** ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Величина одного заряда составляет  $2 \cdot 10^{-5}$  Кл, другого —  $4 \cdot 10^{-4}$  Кл. Определите силу взаимодействия между ними в вакууме, если они находятся на расстоянии 10 см друг от друга.
2. На заряд  $2 \cdot 10^{-7}$  Кл действует сила 0,1 Н. Определите расстояние, на котором находится второй заряд, равный  $4,5 \cdot 10^{-7}$  Кл, если оба заряда находятся в вакууме.

### 1.3. ПОТЕНЦИАЛ

Основными величинами, характеризующими каждую точку электрического поля, являются потенциал и напряженность поля.

При внесении электрического заряда в электрическое поле приходится затрачивать определенную работу на преодоление сил этого поля.

→ **Электрический потенциал** — это величина, определяющая запас энергии (потенциальную энергию) единицы количества электричества, находящейся в данной точке электрического поля.

→ **Потенциалом данной точки поля** называется работа, которую затрачивает электрическое поле, когда оно перемещает положительную единицу заряда из данной точки поля в бесконечно удаленную точку.

Чтобы переместить заряд  $+q$  из бесконечно удаленной точки снова в точку  $B$ , внешние силы должны произвести работу  $A$ , идущую на преодоление электрических сил поля. Потенциал  $\phi$  точки  $B$  равен отношению работы и количества электричества:

$$\phi = \frac{A}{q} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}} = 1 \text{ В.}$$

Работа  $A$  сил электрического поля, Н·м, определяется произведением силы на путь:

$$A = FS,$$

где  $F$  — сила, Н;  $S$  — путь, м.

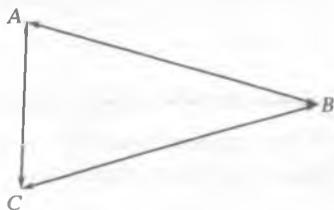


Рис. 1.2. Разность потенциалов между различными точками электрического поля

В электрическом поле положительного заряда потенциал любой точки **положителен**, а в поле отрицательного заряда — **отрицателен**.

При перемещении заряда в пределах электрического поля (рис. 1.2) из точки  $A$  в точку  $B$ , потенциалы которых соответственно равны  $\phi_A$  и  $\phi_B$ , работа, совершаемая силами поля, будет равна разности потенциальной энергии, которой этот заряд обладает в на-

чальной и конечной точках своего пути, т. е. в точках  $A$  и  $B$ . Таким образом, работа  $A$  заряда выразится формулой

$$A = q(\varphi_A - \varphi_B) = qU_{AB}.$$

Разность потенциалов  $\varphi_A, \varphi_B$  принято называть **напряжением**, обозначать буквой  $U$  и измерять, так же как потенциал, в вольтах.

**Пример 1.2.** В точке  $A$  электрического поля потенциал относительно земли  $\varphi_A = 16$  В, в точке  $B$  потенциал  $\varphi_B = 10$  В, а в точке  $C$  потенциал  $\varphi_C = -4$  В. Определить разность потенциалов — напряжение между этими точками.

*Решение*

$$\varphi_A - \varphi_B = U_{AB} = 16 - 10 = 6 \text{ В};$$

$$\varphi_B - \varphi_C = U_{BC} = 10 - (-4) = 14 \text{ В};$$

$$\varphi_C - \varphi_A = U_{CA} = -4 - 16 = -20 \text{ В}.$$



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие величины характеризуют каждую точку электрического поля?
2. Что понимают под электрическим потенциалом?
3. Что называется потенциалом данной точки поля?



## ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Потенциал электрического поля в точке  $A$  составляет 60 В, а в точке  $B$  — 7 В. Заряд  $q = 6$  Кл перенесен из точки  $A$  в точку  $B$ . Рассчитайте, какая при этом будет совершена работа.
2. Определите потенциал в точке электрического поля, если на перенос заряда  $q = 5 \cdot 10^{-7}$  Кл в точку поля было затрачено 0,05 Дж работы.

## 1.4 НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ

Электрическое поле в каждой своей точке характеризуется напряженностью. Чем больше сила  $F$ , с которой электрическое поле действует на заряд  $q$ , внесенный в его пределы, тем больше напряженность поля. В различных точках электрического поля напряженность может быть разной. Напряженность поля, В/м, определяется формулой

$$E = \frac{F}{q},$$

где  $F$  — сила действия электрического поля на заряд, Н;  $q$  — величина электрического заряда, Кл.

Не следует путать понятия «напряженность электрического поля» и «напряжение».

### **!** Запомните

Напряженность электрического поля характеризует поле в какой-либо одной точке посредством силы, действующей на единичный заряд, внесенный в эту точку, а напряжение — это разность потенциалов между двумя точками электрического поля, т. е. работа, совершаемая силами поля при перемещении единичного заряда из одной точки в другую.

### **?** КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется напряженностью электрического поля?
2. В чем состоит отличие напряженности электрического поля от напряжения?

## **1.5.** ПОНЯТИЕ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ТОКЕ

**→** **Электрический ток** — это направленное движение электрических зарядов по проводнику.

Направлением электрического тока следовало бы считать направление движения свободных электронов по металлическому проводнику, однако за него условно принято направление движения положительных зарядов в проводнике. Эта условность сложилась исторически и в настоящее время сохранила свою силу в электротехнике.

Практически электрический ток получают от специальных источников: гальванических элементов, аккумуляторов, генераторов.

Электрический ток непосредственно наблюдать нельзя. О прохождении тока можно судить только по тем действиям, которые он оказывает.

## ! Запомните

Признаки, по которым судят о наличии электрического тока:

- проводник, по которому проходит электрический ток, нагревается;
- электрический ток, проходя по проводнику, создает вокруг него магнитное поле;
- ток, проходя через растворы солей, щелочей, кислот, а также через расплавленные соли, разлагает их на составные части.

Если через поперечное сечение проводника проходит  $q$  Кл (кулонов) электричества за  $t$  с, то количество электричества, прошедшего через поперечное сечение проводника в течение 1 с, называется **величиной тока** и обозначается буквой  $I$ :

$$I = \frac{q}{t}.$$

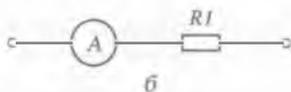
Единицей измерения тока является ампер (А), определяемый как количество электричества в 1 Кл, прошедшего через поперечное сечение проводника в 1 с:

$$1 \text{ А} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ с}}.$$

Ток в электрической цепи измеряется амперметром (рис. 1.3, а). Амперметр включается в электрическую цепь последовательно (рис. 1.3, б). Ток, не изменяющийся по величине и направлению, называется **постоянным током**. Постоянный ток дают гальванические элементы, аккумуляторы, генераторы постоянного тока.



а



б

Рис. 1.3. Амперметр:

а — внешний вид; б — схема включения



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. От каких приборов получают электрический ток?
2. По каким признакам судят о наличии электрического тока?
3. Как включается амперметр в электрическую цепь?

## 1.6. ПРОВОДНИКИ И ДИЭЛЕКТРИКИ

---

Перемещение электронов в определенном направлении и возникновение электрического тока возможно не во всех материалах. Например, в фарфоре, резине, мраморе, слюде свободных электронов практически нет, а все имеющиеся электроны прочно связаны с ядром. Поэтому электрические поля зарядов не могут вызвать перемещения электронов в определенном направлении и по таким материалам электрический ток не проходит. Эти материалы называются **диэлектриками**, или **изоляторами**.

К диэлектрикам относятся воздух, газ, слюда, мрамор, пластмасса, лаки и эмали, электрофарфор, лакоткани, стекловолокно и многие другие материалы.

В металлах, наоборот, много свободных электронов, и под действием сил электрического поля происходит перемещение электрических зарядов. Поэтому по металлу будет протекать электрический ток.

Материалы, проводящие электрический ток, называются **проводниками**. Впервые описание проводников было приведено еще в XIV в. К ним относятся металлы, растворы солей, кислот и щелочей.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Какие материалы называются диэлектриками?
2. Какие материалы, проводящие электрический ток, вы знаете?

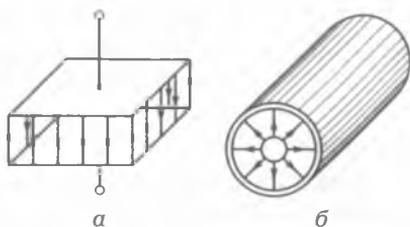
## 1.7. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ. КОНДЕНСАТОРЫ

---



**Электрическая емкость** проводника или устройства, состоящего из двух проводников, разделенных диэлектриком, характеризует их способность накапливать электрические заряды.

Рис. 1.4. Конденсаторы:  
а — плоский; б — цилиндрический



В технике широко применяют **конденсаторы** — устройства, которые при сравнительно малых размерах способны накапливать значительные электрические заряды. Конденсаторы имеют большую электрическую емкость и используются в энергетических установках, устройствах электроники, автоматики и др. Простейший конденсатор состоит из двух близко расположенных металлических пластин (обкладок), между которыми находится диэлектрик (воздух, слюда, фарфор, бумага и т.д.). Для увеличения площади электродов конденсатора его обычно делают многослойным. Схематический вид плоского конденсатора приведен на рис. 1.4, а, а цилиндрического — на рис. 1.4, б. Различные виды конденсаторов представлены на рис. 1.5.



Рис. 1.5. Различные виды конденсаторов

Электрическая емкость конденсатора определяется отношением величины заряда на его пластинах к напряжению между ними:

$$C = \frac{q}{U}.$$

Электрическая емкость измеряется в фарадах (Ф). Емкость конденсатора равна 1 Ф, если увеличение его заряда на 1 Кл электричества вызывает повышение напряжения между его обкладками на 1 В (вольт):

$$1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}.$$

Фарад — очень крупная единица емкости, которая практически не применяется. Обычно используют более мелкие единицы емкости — микрофарад (мкФ), нанофарад (нФ) и пикофарад (пФ):

$$1 \text{ Ф} = 10^6 \text{ мкФ} = 10^9 \text{ нФ} = 10^{12} \text{ пФ}.$$

Опытным путем установлено, что емкость конденсатора прямо пропорциональна электрической проницаемости диэлектрика, находящегося между пластинами конденсатора, а также зависит от расстояния между пластинами. Конденсатор, у которого пластины находятся на большом расстоянии друг от друга, обладает меньшей емкостью. Пластины конденсатора, которые имеют большую площадь, заряжаются большим количеством электричества и соответственно обладают большей емкостью. Все сказанное позволяет записать следующую формулу для определения емкости плоского конденсатора, Ф:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{4\pi d},$$

где  $\epsilon_0$  — относительная электрическая проницаемость вакуума;  $\epsilon_r$  — относительная электрическая проницаемость диэлектрика;  $S$  — площадь одной из пластин конденсатора, м<sup>2</sup>;  $d$  — расстояние между пластинами, м.

**Пример 1.3.** Конденсатор имеет две пластины. Площадь каждой пластины составляет 15 см<sup>2</sup>. Между пластинами помещен диэлектрик — пропарафинированная бумага толщиной 0,02 см. Определить емкость этого конденсатора.

*Решение*

Из табл. 1.1 следует, что диэлектрическая проницаемость пропарафинированной бумаги  $\epsilon = 2,2$ . Емкость конденсатора

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{4\pi d} = \frac{2,2 \cdot 15 \cdot 10^{-4}}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,02 \cdot 10^{-2}} = 1650 \text{ пФ}.$$

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется электрической емкостью конденсатора?
2. От каких параметров зависит емкость конденсатора?
3. Как диэлектрическая проницаемость материала влияет на размеры конденсатора?

## 1.8. СОЕДИНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ

На практике используют три вида соединений конденсаторов: последовательное, параллельное и смешанное. Обозначения конденсаторов на электрических схемах даны на рис. 1.6.

**Последовательное соединение конденсаторов.** При последовательном соединении конденсаторов (рис. 1.7) правая пластина первого конденсатора соединяется с левой пластиной второго, правая пластина второго — с левой пластиной третьего и т. д. В этом случае их эквивалентная (общая) емкость уменьшается. Так происходит потому, что общая толщина диэлектрика увеличивается, что приводит к уменьшению общей емкости. Эквивалентную емкость при последовательном соединении конденсаторов определяют по формуле

$$\frac{1}{C_{\text{эКВ}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots \quad (1.1)$$

Если последовательно включены только два конденсатора, то эквивалентную емкость рассчитывают по следующей формуле:

$$C_{\text{эКВ}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

Если последовательно включено несколько одинаковых конденсаторов, то их эквивалентную емкость вычисляют по формуле



Рис. 1.6. Обозначения конденсаторов на электрических схемах:

а — конденсатор постоянной емкости; б — поляризованный конденсатор; в — подстроечный конденсатор переменной емкости

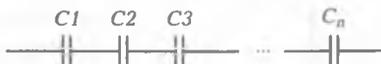


Рис. 1.7. Схема последовательного соединения конденсаторов

$$C_{\text{экв}} = \frac{C}{n}$$

где  $C$  — емкость одного конденсатора, Ф;  $n$  — число последовательно включенных конденсаторов.

Общее напряжение, приложенное к последовательно соединенным конденсаторам, равно сумме напряжений на отдельных конденсаторах:

$$U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

### Запомните

- Последовательное соединение конденсаторов применяется в том случае, если напряжение в цепи больше рабочего напряжения одного конденсатора.
- При последовательном соединении эквивалентная емкость меньше самой малой из соединенных емкостей.

Например, если напряжение в цепи равен 600 В, а в распоряжении имеются три одинаковых конденсатора, причем рабочее напряжение каждого из них составляет 200 В, то их можно включить в цепь, соединив предварительно последовательно. Это дает возможность, даже не рассчитывая общую емкость, приблизительно оценить ее величину. В частности, если соединены последовательно три конденсатора емкостью 0,1, 3 и 10 мкФ, то заранее можно сказать, что их общая емкость будет меньше 0,1 мкФ. Подсчет по формуле (1.1) дает значение общей емкости 0,096 мкФ.

**Параллельное соединение конденсаторов.** Схема параллельного соединения конденсаторов приведена на рис. 1.8.

Эквивалентную емкость при параллельном соединении конденсаторов определяют по формуле

$$C_{\text{экв}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots,$$

т. е. эквивалентная емкость параллельно соединенных конденсаторов равна сумме емкостей всех включенных конденсаторов. Это объясняется тем, что при параллельном соединении конденсаторов происходит как бы увеличение площади пластин, что приводит к увеличению емкости.

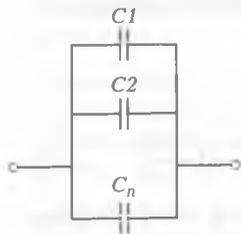


Рис. 1.8. Схема параллельного соединения конденсаторов

Если параллельно включено  $n$  одинаковых конденсаторов, то эквивалентную емкость можно рассчитать по следующей формуле:

$$C_{\text{экв}} = nC.$$

Напряжение на каждом из параллельно включенных конденсаторов  $U_C$  равно напряжению цепи  $U_{\text{общ}}$ .

### **!** Запомните

К параллельно соединенным конденсаторам можно подвести напряжение, не превышающее рабочее напряжение каждого из них.

**Смешанное соединение конденсаторов.** Такое соединение конденсаторов представляет собой совокупность последовательного и параллельного соединений (рис. 1.9). Его применяют в том случае, когда необходимо использовать положительные свойства последовательного и параллельного соединений конденсаторов.

**Пример 1.4.** В цепь напряжением 600 В необходимо включить емкость 2 мкФ. В распоряжении имеются четыре конденсатора емкостью 2 мкФ каждый. Рабочее напряжение каждого из них равно 300 В. Как нужно включить конденсаторы для включения их в цепь?

#### *Решение*

Рабочее напряжение конденсаторов меньше напряжения цепи в два раза, поэтому конденсаторы необходимо соединить последовательно (см. рис. 1.9). При этом напряжение на каждом конденсаторе будет составлять 300 В, а эквивалентная емкость  $C'_{\text{экв}} = 1$  мкФ:

$$C'_{\text{экв}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{2 \cdot 2}{2 + 2} = 1 \text{ мкФ}.$$

Чтобы получить необходимую емкость 2 мкФ, параллельно конденсаторам  $C_1$  и  $C_2$  включим еще два последовательно соединенных конденсатора  $C_3$  и  $C_4$ . Эквивалентную емкость конденсаторов  $C_3$  и  $C_4$  определим по формуле

$$C''_{\text{экв}} = \frac{C_3 C_4}{C_3 + C_4} = \frac{2 \cdot 2}{2 + 2} = 1 \text{ мкФ}.$$

Емкости  $C'_{\text{экв}}$  и  $C''_{\text{экв}}$  соединены параллельно, поэтому эквивалентная емкость четырех конденсаторов составит:

$$C_{\text{экв}} = C'_{\text{экв}} + C''_{\text{экв}} = 2 \text{ мкФ}.$$

Соответственно и напряжение на каждом конденсаторе будет равно 300 В.

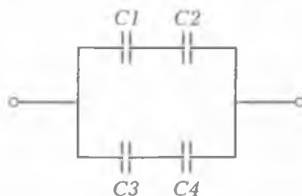


Рис. 1.9. Схема смешанного соединения конденсаторов



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Каковы единицы измерения электрической емкости и их соотношение?
2. Как влияет диэлектрик на емкость конденсатора?
3. При каком соединении конденсаторов общая емкость уменьшается?
4. В каких случаях применяется параллельное соединение конденсаторов?



## ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

---

1. Найдите емкость плоского стеклянного конденсатора, если площадь каждой пластины составляет  $50 \text{ см}^2$ , расстояние между пластинами —  $5 \text{ мм}$  и относительная диэлектрическая проницаемость стекла —  $5$ .
2. Определите, сколько конденсаторов по  $150 \text{ пФ}$  нужно соединить параллельно, чтобы получить емкость  $600 \text{ пФ}$ .
3. Пять конденсаторов емкостью по  $1 \text{ мкФ}$  включены последовательно в цепь напряжением  $U = 1500 \text{ В}$ . Рассчитайте общую емкость и напряжение на каждом конденсаторе.

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**К** В результате изучения данной главы вы должны:

- **уметь:**
  - составлять простые схемы электрических цепей;
  - применять закон Ома для расчета электрических цепей;
  - производить преобразование электрических цепей с последовательным, параллельным и смешанным соединением элементов;
  - составлять уравнения Кирхгофа для расчета электрических цепей;
- **знать:**
  - закон Ома для участка и полной цепи;
  - схемы включения амперметра и вольтметра в электрическую цепь;
  - первый и второй законы Кирхгофа.

## 2.1. ИСТОЧНИКИ И ПРИЕМНИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**→** **Электрическая цепь** — это совокупность устройств, образующих замкнутый путь для электрического тока. Электрическая цепь состоит из источников электрической энергии, приемников, соединенных проводами, вспомогательных и измерительных устройств.

**Источниками** электрической энергии являются аккумуляторы, термоэлектрические элементы, электрические генераторы, фотоэлектрические элементы и другие устройства, в которых про-

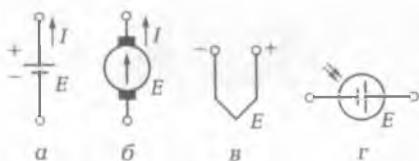


Рис. 2.1. Условные обозначения источников постоянного тока на электрических схемах:

*a* — гальванический элемент; *б* — генератор постоянного тока; *в* — термопара; *г* — фотоэлемент

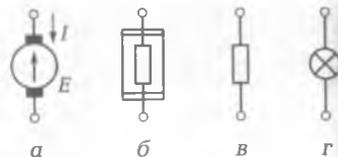


Рис. 2.2. Условные обозначения приемников электрической энергии на схемах:

*a* — двигатель постоянного тока; *б* — электрическая печь; *в* — резистор; *г* — лампа накаливания

исходит преобразование различного вида энергии (энергии химических реакций, тепловой, механической, световой энергии и т. д.) в электрическую энергию (рис. 2.1).

**Приемниками** электрической энергии являются электролампы, электронагреватели, электродвигатели и другие устройства, в которых электрическая энергия преобразуется в энергию какого-либо другого вида (тепловую, механическую, световую и т. д.). Условные обозначения некоторых приемников электрической энергии приведены на рис. 2.2.

В качестве **соединительных элементов** используют соединительные провода, воздушные линии электропередачи, электрические кабели.

**Вспомогательные устройства** служат для управления режимом электрической сети и ее защиты. К ним относятся: выключатели, переключатели, штепсельные разъемы, предохранители и др.

В качестве **измерительных устройств** используют амперметры и вольтметры, ваттметры, предназначенные для измерения токов, напряжений и мощности на участках электрической цепи. Простейшая электрическая цепь постоянного тока приведена на рис. 2.3.

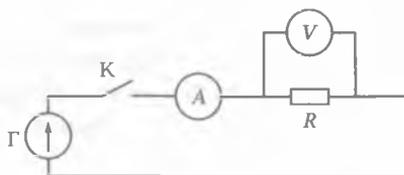


Рис. 2.3. Схема электрической цепи постоянного тока:

*Г* — генератор постоянного тока; *R* — приемник (резистор); *A* — амперметр; *V* — вольтметр; *K* — выключатель



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется электрической цепью?
2. Из каких элементов состоит электрическая цепь?
3. Для чего нужны вспомогательные устройства?

## 2.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Направленному движению электрических зарядов в любом проводнике препятствуют молекулы и атомы этого проводника. Поэтому и внешний участок электрической цепи, и внутренний (внутри самого источника энергии) оказывают препятствие прохождению тока.



Величина, характеризующая противодействие электрической цепи прохождению электрического тока, называется **электрическим сопротивлением**.

Электрическое сопротивление обозначается буквой  $R$  и изображается на электрических схемах так, как показано на рис. 2.4.

Единицей измерения сопротивления является ом. Электрическое сопротивление линейного проводника, в котором при неизменяющейся разности потенциалов в 1 В протекает ток силой в 1 А, равно 1 Ом:

$$1 \text{ Ом} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}}$$

При измерении больших сопротивлений используют единицы в 1 000 (килоомы) и 1 млн раз (мегаомы) больше 1 Ом:

$$1 \text{ кОм} = 1\,000 \text{ Ом};$$

$$1 \text{ МОм} = 1\,000\,000 \text{ Ом}.$$

Для относительной оценки электрических свойств материала проводника служит его удельное сопротивление.



**Удельное сопротивление** — это сопротивление металлического проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения  $1 \text{ мм}^2$ ; обозначается буквой  $\rho$  и измеряется в Ом · м или Ом · мм<sup>2</sup>/м.

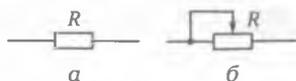


Рис. 2.4. Условные графические изображения резисторов:

$a$  — с постоянным сопротивлением;  $b$  — с регулируемым сопротивлением

Если проводник, изготовленный из материала с удельным сопротивлением  $\rho$ , имеет длину  $l$ , м, и площадь поперечного сечения  $S$ , м<sup>2</sup>, то сопротивление  $R$  этого проводника, Ом, определяется по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Сопротивление проводников зависит от температуры. Сопротивление металлических проводников с повышением температуры увеличивается. Эта зависимость достаточно сложная, но в относительно узких пределах изменения температуры (примерно до 200 °С) можно считать, что для каждого металла существует определенный, так называемый температурный, коэффициент сопротивления  $\alpha$ , который выражает прирост сопротивления проводника  $\Delta R$  при изменении температуры на 1 °С, отнесенный к 1 Ом начального сопротивления. Таким образом, температурный коэффициент сопротивления

$$\alpha = \frac{R_2 - R_1}{R_1(T_2 - T_1)},$$

а прирост сопротивления

$$\Delta R = R_2 - R_1 = \alpha R_1(T_2 - T_1),$$

где  $R_1$  — сопротивление проводника при температуре  $T_1$ ;  $R_2$  — сопротивление того же проводника при температуре  $T_2$ .

Способность проводника пропускать электрический ток характеризуется **проводимостью**, которая представляет собой величину, обратную сопротивлению, и обозначается буквой  $g$ . Единицей измерения проводимости в СИ является 1/Ом (сименс). Таким образом,

$$g = \frac{1}{R}.$$

Величина, обратная удельному сопротивлению материала проводника, называется **удельной проводимостью** и обозначается буквой  $\gamma$ . Таким образом, между удельным сопротивлением и удельной проводимостью материала имеет место следующее соотношение:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}.$$

Удельные сопротивления различных проводников приведены в табл. 2.1.

**Пример 2.1.** Проволока сечением 0,5 мм<sup>2</sup> и длиной 40 м имеет сопротивление 18 Ом. Определить материал проводника.

**Таблица 2.1. Удельные сопротивления различных проводников**

Материал проводника	Удельное сопротивление $\rho$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м
Серебро	0,016
Медь	0,0175
Алюминий	0,03
Вольфрам	0,05
Железо	0,13
Свинец	0,2
Никелин (сплав меди, никеля и цинка)	0,42
Манганин (сплав меди, никеля и марганца)	0,43
Ртуть	0,94
Нихром (сплав никеля, железа и марганца)	1,1

*Решение*

Материал проводника характеризует его удельное электрическое сопротивление:

$$\rho = \frac{RS}{l} = \frac{16 \cdot 0,5}{40} = 0,2 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}.$$

Из табл. 2.1 видно, что таким удельным сопротивлением обладает свинец.

**? КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. От каких параметров зависит удельное сопротивление металлического проводника?
2. В каких единицах системы СИ измеряется электрическая проводимость?
3. Как зависит от длины кабеля электрическое сопротивление его жилы и сопротивление изоляции?
4. Как изменяется сопротивление металлического проводника с увеличением температуры?

**П ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ**

1. Определите сопротивление стальной проволоки длиной 200 м и площадью сечения 5 мм<sup>2</sup>.

- Найдите проводимости проводников, если их сопротивления равны: 5 Ом, 1 кОм, 120 кОм и 2 МОм.
- Рассчитайте площадь сечения медной проволоки длиной 20 м, если сопротивление ее равно 26 Ом.

## 2.3. ЗАКОН ОМА

Немецкий физик Георг Ом (1787 — 1854) экспериментально установил зависимость между электродвижущей силой (ЭДС)  $E$ , сопротивлением  $R$  и током  $I$  в замкнутой электрической цепи (рис. 2.5).

→ Закон Ома формулируется следующим образом: *сила тока в замкнутой электрической цепи прямо пропорциональна электродвижущей силе и обратно пропорциональна сопротивлению всей цепи.*

Ток в цепи возникает под действием ЭДС  $E$ . Чем больше ЭДС  $E$  источника энергии, тем больше ток  $I$  в замкнутой цепи. Сопротивление цепи  $R$  препятствует прохождению тока, следовательно, чем больше сопротивление  $R$  цепи, тем меньше ток  $I$ .

Закон Ома можно выразить следующей формулой:

$$I = \frac{E}{R + R_i} \quad (2.1)$$

или

$$E = I(R + R_i),$$

где  $R$  — сопротивление внешней части цепи;  $R_i$  — внутреннее сопротивление источника.

В этих формулах ток выражен в амперах (А), ЭДС — в вольтах (В), сопротивление — в омах (Ом).

Сопротивление всей цепи (см. рис. 2.5)

$$R + R_i = \frac{E}{I}.$$

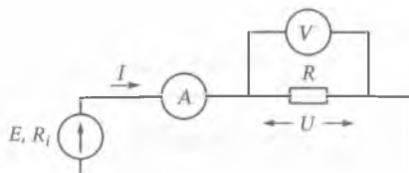


Рис. 2.5. Электрическая цепь к закону Ома

Из закона Ома для замкнутой цепи получим

$$E = IR + IR_i = U + IR_i \quad (2.2)$$

где  $IR$  — падение напряжения в сопротивлении  $R$ , т. е. во внешней цепи, или напряжение на зажимах источника энергии (генератора);  $IR_i$  — падение напряжения в сопротивлении  $R_i$ , т. е. внутри источника энергии (генератора).

### **!** Запомните

Закон Ома справедлив не только для всей цепи, но и для любого ее участка: *сила тока на участке электрической цепи равна напряжению на зажимах этого участка, деленному на его сопротивление:*

$$I = \frac{U}{R}$$

Напряжение на участке цепи равно произведению силы тока на сопротивление этого участка, т. е.  $U = IR$ .

Для измерения силы тока в электрической цепи используют прибор **амперметр**, а для измерения напряжения — **вольтметр**.

Для включения амперметра цепь тока разрывается и в месте разрыва концы проводов присоединяются к зажимам амперметра (см. рис. 2.5). Таким образом через прибор проходит весь измеряемый ток. Вольтметр подключают к началу и концу участка цепи; такое включение вольтметра называется **параллельным** (см. рис. 2.5). Вольтметр показывает падение напряжения на данном участке. Если вольтметр подключить к началу внешней цепи — положительному полюсу источника энергии и к концу внешней цепи — отрицательному полюсу источника энергии, то он покажет падение напряжения во всей внешней цепи, которое является в то же время напряжением на зажимах источника энергии.

Из формулы (2.2) следует, что напряжение на зажимах источника электрической энергии (генератора)

$$U = E - IR_i$$

При **холостом ходе** внешняя цепь разомкнута и тока в цепи нет, вследствие чего  $U = E$ . При замкнутой цепи напряжение не равно ЭДС и чем больше сила тока в цепи, тем больше напряжение отличается от ЭДС.

Если зажимы источника электрической энергии соединить проводником с сопротивлением, практически равным нулю, то формула (2.1) для этого случая примет следующий вид:

$$I = \frac{E}{R_i}$$

Это выражение определяет наибольший ток, который может быть получен в цепи данного источника. Если сопротивление внешней электрической цепи практически равно нулю, то такой режим называется **коротким замыканием**.

### **!** Запомните

Возникновение короткого замыкания может привести к аварийному режиму в цепи.

Для источников с малым внутренним сопротивлением, например электрических генераторов и кислотных аккумуляторов, короткое замыкание весьма опасно. Короткое замыкание возникает достаточно часто, например, вследствие порчи изоляции проводов, соединяющих приемник с источником электрической энергии. Для защиты электротехнической аппаратуры от токов короткого замыкания применяют различные автоматические предохранительные устройства.

**Пример 2.2.** Электродвижущая сила  $E$  гальванического элемента с внутренним сопротивлением  $R_i = 0,3$  Ом равна 1,5 В и замкнута на сопротивление  $R = 2,7$  Ом. Определить ток в цепи.

*Решение*

Сила тока в цепи по закону Ома

$$I = \frac{E}{R + R_i} = \frac{1,5}{2,7 + 0,3} = 0,5 \text{ А.}$$

### **?** КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Зависимость между какими величинами устанавливает закон Ома для участка электрической цепи?
2. Как изменится ток в цепи, если напряжение увеличить в два раза?
3. Как определить сопротивление участка цепи, зная величину тока, проходящего через этот участок, и напряжение на нем?
4. Чем опасен режим короткого замыкания?



## ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Электрическая лампочка включена в сеть напряжением 220 В. Рассчитайте, какой ток будет протекать через лампочку, если сопротивление ее нити составляет 240 Ом.
2. Электропаяльник, включенный в сеть напряжением 220 В, потребляет ток 0,3 А. Определите сопротивление электропаяльника.
3. К кислотному аккумулятору, имеющему ЭДС 2,5 В и внутреннее сопротивление 0,1 Ом, подключен потребитель сопротивлением 12 Ом. Вычислите ток в цепи.

## 2.4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ, ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ И СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ РЕЗИСТОРОВ

**Последовательное соединение резисторов.** Электрическая цепь может содержать несколько приемников электрической энергии, имеющих различные сопротивления. При расчете электрических цепей используют понятие «эквивалентное сопротивление»  $R_{\text{ЭКВ}}$ .



**Эквивалентным** (или общим) называется такое сопротивление, при включении которого в цепь вместо данной группы сопротивлений электрические условия всей остальной цепи остаются неизменными.

Пусть, например, внешняя цепь генератора (рис. 2.6) состоит из трех приемников электрической энергии с сопротивлениями  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ . Такое соединение приемников электрической энергии, при котором каждый из них поочередно включен в одну замкнутую электрическую цепь, называется **последовательным**. При этом ток во всех приемниках одинаков, а сопротивление внешней цепи равно сумме сопротивлений приемников.

Для этого случая формула закона Ома имеет следующий вид:

$$I = \frac{E}{R_0 + R_1 + R_2 + R_3}$$

При наличии трех последовательно соединенных проводников общее сопротивление цепи составляет

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_0 + R_1 + R_2 + R_3$$

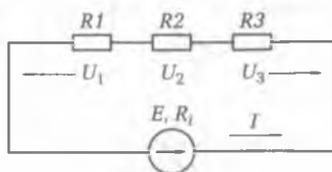


Рис. 2.6. Последовательное соединение резисторов

а сопротивление внешней цепи

$$R_{\text{вн}} = R_1 + R_2 = R_3.$$

Напряжение на зажимах источника энергии равно напряжению, приложенному к внешней цепи:

$$U = E - IR_i = I(R_1 + R_2 + R_3).$$

Напряжение на зажимах каждого из последовательно соединенных приемников энергии равно произведению тока на сопротивление этого приемника:

$$U_1 = IR_1; \quad U_2 = IR_2; \quad U_3 = IR_3,$$

а общее напряжение участка цепи

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Таким образом, сумма напряжений на последовательно соединенных приемниках равна напряжению на зажимах источника энергии.

При неизменном напряжении ток зависит от сопротивления цепи. Изменение сопротивления одного из последовательно включенных приемников влечет за собой изменение как общего сопротивления всей цепи, так и тока в ней.



### Запомните

Последовательное включение добавочных резисторов используется на практике для понижения напряжения (пусковые и регулировочные реостаты), а также для расширения пределов измерения измерительных приборов, например вольтметров.

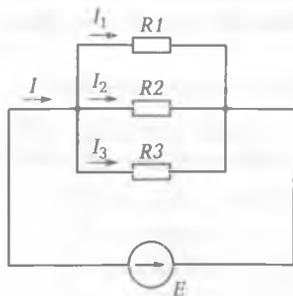


Рис. 2.7. Параллельное соединение резисторов

**Параллельное соединение резисторов.** Элементы электрической цепи, находящиеся под одним и тем же напряжением, называются *параллельно соединенными*. При параллельном соединении резисторов (рис. 2.7) ток разветвляется по трем ветвям, тем самым уменьшая общее сопротивление или увеличивая общую проводимость цепи  $g$ :

$$g_{\text{общ}} = g_1 + g_2 + g_3.$$

При этом

$$g = \frac{1}{R}$$

Так как проводимость есть величина, обратная сопротивлению, то общее сопротивление может быть записано в следующем виде:

$$\frac{1}{R_{\text{экр}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Установленное соотношение справедливо для любого числа параллельно соединенных резисторов.

В частном случае, если в электрической цепи содержатся два параллельно соединенных резистора  $R_1$  и  $R_2$ , то можно написать следующее выражение для общего сопротивления:

$$R_{\text{экр}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

Если параллельно соединено какое-либо число  $n$  одинаковых резисторов  $R$ , то общее сопротивление такой цепи будет в  $n$  раз меньше сопротивления одного резистора:

$$R_{\text{экр}} = \frac{R}{n}$$

Для схемы рис. 2.7 также будут справедливы следующие соотношения:

$$I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3 = U_i$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}; \quad \frac{I_2}{I_3} = \frac{R_3}{R_2} \quad \text{и т. д.}$$

Эти соотношения указывают на то, что в цепях с параллельно включенными резисторами токи распределяются обратно пропорционально этим сопротивлениям или прямо пропорционально проводимостям этих проводников.

Таким образом, чем больше значение включенного параллельно резистора, тем меньше ток в нем, и наоборот.



### Запомните

На практике параллельное включение резистора на участке электрической цепи используется для уменьшения тока на данном участке. В частности, такой параллельно включаемый резистор, на-

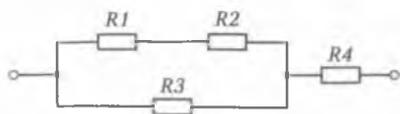


Рис. 2.8. Смешанное соединение резисторов

зывается шунтом, применяется для расширения пределов измерения токов амперметрами. При наличии шунта в прибор отвечает лишь часть измеряемого тока.

**Смешанное соединение резисторов.** Если в электрической цепи резисторы, соединенные параллельно между собой, включены последовательно с другими резисторами, то такое соединение их называется **смешанным** (рис. 2.8).

При смешанном соединении резисторов определение общего, или эквивалентного, сопротивления  $R_{\text{экв}}$  электрической цепи производится поэтапно. Например, для схемы рис. 2.8 сначала определяется сопротивление  $R_{12}$  последовательно включенных резисторов  $R1$  и  $R2$ , затем эквивалентное сопротивление  $R_{123}$ , параллельно соединенных резисторов с сопротивлениями  $R_{12}$  и  $R_3$ , а далее — эквивалентное сопротивление всей цепи  $R_{\text{экв}}$ :

$$R_{12} = R_1 + R_2;$$

$$R_{123} = \frac{R_{12}R_3}{R_{12} + R_3};$$

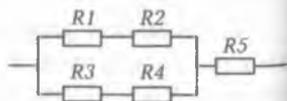
$$R_{\text{экв}} = R_{123} + R_4.$$

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое соединение приемников электрической цепи считается параллельным?
2. Чему равна сумма напряжений последовательно соединенных приемников?
3. Какое соединение резисторов называется смешанным?

## П ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Определите эквивалентное сопротивление электрической цепи, приведенной на рисунке, если  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 10 \text{ Ом}$ .



- Восемь проводников сопротивлением 10 Ом каждый соединены в четыре одинаковые параллельные группы. Найдите эквивалентное сопротивление цепи и нарисуйте электрическую схему.
- Разветвление из трех параллельно включенных резисторов сопротивлениями 3, 8 и 6 Ом включено последовательно с другим разветвлением, состоящим из четырех резисторов по 5 Ом. Определите эквивалентное сопротивление цепи и нарисуйте электрическую схему.
- Рассчитайте, какое сопротивление нужно включить параллельно приемнику, сопротивление которого равно 8 Ом, чтобы общее сопротивление цепи составило 1,6 Ом.

## 2.5. ЗАКОНЫ КИРХГОФА

Для расчета сложных электрических цепей и определения их электрического состояния применяют законы Кирхгофа, называемые в некоторых источниках также правилами Кирхгофа, которые были сформулированы Густавом Кирхгофом в 1845 г.

Для сложных электрических цепей применяют понятия «ветвь», «узел» и «контур».

➔ **Ветвь электрической цепи** — это участок цепи, вдоль которого проходит один и тот же ток и который состоит из последовательно соединенных элементов (резисторов, источников ЭДС и т. д.).

➔ **Узел электрической цепи** — это место соединения трех и более ветвей.

➔ **Контур электрической цепи** — это любой замкнутой путь, который можно обойти, перемещаясь по нескольким ее ветвям.

Электрическая цепь, состоящая из трех ветвей, двух узлов и трех контуров, дана на рис. 2.9.

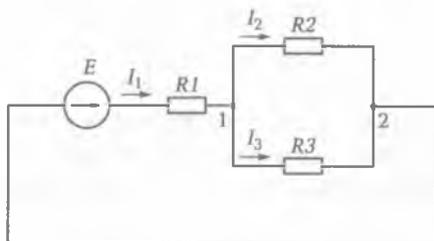


Рис. 2.9. Электрическая цепь

**Первый закон Кирхгофа** (закон для токов) относится к узлам электрической цепи и формулируется так.

→ *Алгебраическая сумма токов в узле электрической цепи в любой момент времени равна нулю:*

$$\sum I_k = 0.$$

При этом токи, направленные к узлу, принимают со знаком «+», а токи, направленные от узла, — со знаком «-».

Запишем уравнение первого закона Кирхгофа для схемы рис. 2.9 (узла 1):

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0.$$

Для расчетов сложных электрических цепей с несколькими источниками энергии используют **второй закон Кирхгофа**, который может быть сформулирован следующим образом.

→ *В замкнутом электрическом контуре алгебраическая сумма падений напряжений на участках цепи равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в этом контуре:*

$$\sum U_k = \sum E_k \quad \text{или} \quad \sum I_k R_k = \sum E_k.$$

*При составлении уравнений слагаемые берут со знаком «+», если действующие на участках напряжения и ЭДС совпадают с направлением обхода, и со знаком «-», если их действия противоположны направлению обхода.*

Для схемы рис. 2.9 запишем уравнения по второму закону Кирхгофа для трех контуров:

$$E = I_1 R_1 + I_2 R_2;$$

$$E = I_1 R_1 + I_3 R_3;$$

$$0 = I_2 R_2 + I_3 R_3.$$

При включении в электрическую цепь источников электрической энергии, ЭДС которых совпадают по направлению (рис. 2.10, а), ЭДС всей цепи равна сумме ЭДС этих источников (согласное включение):

$$E = E_1 + E_2 + E_3 + \dots = \sum E_k.$$

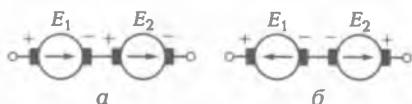


Рис. 2.10. Включение источников питания:  
*a* — согласное; *б* — встречное

Если же в цепи ЭДС источников имеют противоположные направления (рис. 2.10, *б*), то результирующая ЭДС равна разности ЭДС этих источников (встречное включение):

$$E = E_1 - E_2 - E_3 - \dots$$

При составлении уравнений необходимо выбрать направления обхода цепи и произвольно задаться направлениями токов.

Расчет сложной электрической цепи с несколькими ЭДС производят с помощью уравнений 1-го и 2-го законов Кирхгофа в следующем порядке.

1. Условно задаются направлениями токов на различных участках цепи.

2. Определяют число уравнений, которое необходимо составить для решения задачи. Если известны все ЭДС и сопротивления цепи, число уравнений должно быть равно числу неизвестных токов.

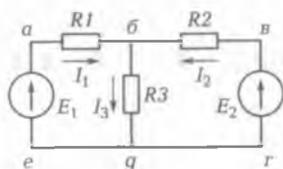
3. Составляют уравнения с помощью уравнений 1-го закона Кирхгофа. Число уравнений по 1-му закону Кирхгофа на единицу меньше числа узлов электрической схемы. Остальные уравнения составляют по 2-му закону Кирхгофа.

4. Намечают независимые контура, направления обхода этих контуров и приступают к составлению уравнений по 2-му закону Кирхгофа. Если направления обхода не совпадают с направлениями ЭДС или направлениями токов на отдельных участках контура, то величины ЭДС и падения напряжения записывают в уравнении со знаком «-».

5. Решают полученную систему уравнений. Если в результате решения уравнений некоторые из токов получились отрицательными, то это означает, что направление токов было выбрано неправильно. Необходимо изменить направление токов на схеме.

6. Проверяют правильность решения путем подстановки полученных значений токов в одно из составленных уравнений.

**Пример 2.3.** Электрическая цепь, проведенная на рисунке, имеет следующие параметры:  $E_1 = 6$  В,  $E_2 = 2$  В,  $R_1 = 2$  Ом,  $R_2 = 4$  Ом,  $R_3 = 5$  Ом. Определить токи во всех ветвях схемы.



### Решение

Произвольно выбираем направление токов в ветвях цепи. Для узла б записываем уравнение 1-го закона Кирхгофа:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0.$$

Для контура  $a - б - г - e$  и контура  $a - в - г - e$  составляем уравнения 2-го закона Кирхгофа:

$$E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3;$$

$$E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2.$$

Таким образом, имеем три независимых уравнения с тремя неизвестными. Подставляем числовые значения в эти уравнения и решаем их:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0;$$

$$6 = I_1 \cdot 2 + I_3 \cdot 5;$$

$$6 - 2 = I_1 \cdot 2 - I_2 \cdot 4;$$

$$I_1 = 1,1578 \text{ A};$$

$$I_2 = -0,4211 \text{ A};$$

$$I_3 = 0,7368 \text{ A}.$$

Знак «-» показывает, что действительное направление тока  $I_2$  обратно принятому направлению.

Проведем проверку, подставив полученные значения токов в уравнение 1-го закона Кирхгофа:

$$1,1578 - 0,4211 - 0,73688 \approx 0.$$



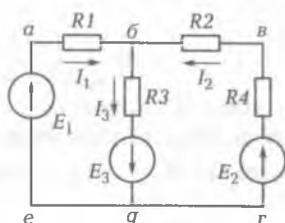
## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется узлом, ветвью и контуром электрической цепи?
2. В чем состоит суть 1-го и 2-го законов Кирхгофа? Сформулируйте их.
3. Как необходимо выбрать направления обхода электрической цепи при составлении уравнений?
4. Какое включение в электрическую цепь источников электрической энергии называется согласным, а какое — встречным?

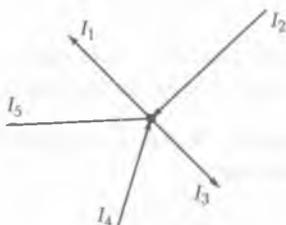


## ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Установите, сколько узлов, ветвей и контуров имеет электрическая цепь, изображенная на рисунке.



2. Для узла, изображенного на рисунке, напишите уравнение по 1-му закону Кирхгофа.



3. Напишите уравнения по второму закону Кирхгофа для контуров  $a-b-d-e$  и  $b-v-g-d$ , изображенных на рисунке задания 1.
4. Напряжение сети составляет 16 В, общий ток, потребляемый четырьмя параллельно включенными одинаковыми лампами, — 2 А. Определите сопротивление каждой лампы.

## 2.6. РАБОТА И МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Способность тела производить работу называется **энергией этого тела**. Энергия не исчезает, а переходит из одной формы в другую.

Электрическая энергия может быть превращена в механическую, тепловую, химическую и т.д. Энергия тела тем больше, чем большую работу может произвести это тело при своем движении.

Для переноса зарядов в замкнутой цепи источник электрической энергии затрачивает известную энергию и совершает работу, Дж:

$$A = Eq,$$

где  $E$  — ЭДС источника, В;  $q$  — количество электричества, Кл.

Однако не вся работа, произведенная источником энергии, общается приемнику энергии, так как часть ее расходуется на преодоление внутреннего сопротивления источника и проводов. Таким образом, источник электрической энергии производит полезную работу

$$A = Uq,$$

где  $U$  — напряжение на зажимах приемника, В.

При неизменном токе количество электричества равно произведению силы тока в цепи на время его прохождения:

$$q = It.$$

Тогда формулу работы можно представить в следующем виде:

$$A = UIt.$$

*Работа электрического тока равна произведению напряжения, силы тока в цепи и времени его прохождения.*

Согласно закону Ома  $U = IR$ , поэтому формулу работы можно записать следующим образом:

$$A = I^2Rt.$$

Однако ни одна из указанных формул не определяет размеров генератора электрической энергии, от которого получена эта работа, так как и большой, и малый генераторы могут производить одинаковую работу, но в различные промежутки времени. Поэтому размеры генератора определяются не выполненной работой, а его мощностью. Это относится к любому электротехническому аппарату и любой машине (электродвигатели, электрические лампы, нагревательные приборы и т. д.).

→ **Мощностью** называется работа, производимая (или потребляемая) в 1 с.

Мощность можно представить следующей формулой:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{Uq}{t} = UI = I^2R.$$

Единицей измерения мощности является ватт (Вт):

$$1 \text{ Вт} = 1\,000 \text{ мВт} = 1\,000\,000 \text{ мкВт}.$$

Для измерения больших мощностей применяют мега- и киловатты:

$$1 \text{ МВт} = 1\,000 \text{ кВт} = 1\,000\,000 \text{ Вт.}$$

Так как ватт-секунда (джоуль) является малой единицей, то работа обычно выражается в более крупных единицах: ватт-часах [Вт·ч] и киловатт-часах [кВт·ч]. Соотношения между этими единицами и джоулем следующие:

$$1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3\,600 \text{ Дж}; 1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3\,600\,000 \text{ Дж.}$$

Мощность во внешней цепи при напряжении  $U$  на зажимах генератора

$$P = UI.$$

Для измерения мощности электрического тока применяется прибор, называемый **ваттметром**.



### Запомните

Сопротивление внешней цепи  $R$ , при котором источник энергии отдает приемнику наибольшую мощность, равно внутреннему сопротивлению источника:

$$R = Ri.$$

Однако при равенстве внутреннего сопротивления генератора сопротивлению внешней цепи полезная мощность генератора недостаточна и работа его в таких условиях неэкономична, так как половина всей мощности, развиваемой генератором, затрачивается на преодоление его внутреннего сопротивления.

**Пример 2.4.** Источник энергии с ЭДС  $E = 120 \text{ В}$  и внутренним сопротивлением  $R_i = 10 \text{ Ом}$  замыкается на нагрузку, сопротивление которой последовательно принимает следующие значения:  $R = 50; 20; 10; 5 \text{ Ом}$ .

Определить мощность, отдаваемую источником энергии во внешнюю цепь, при различных сопротивлениях нагрузки.

*Решение*

Сила тока в замкнутой цепи

$$I = \frac{E}{R_i + R}.$$

Мощность во внешней цепи

$$P = I^2 R.$$

При  $R = 50 \text{ Ом}$ :

$$I_1 = \frac{120}{50 + 10} = 2 \text{ А}; P = 4 \cdot 50 = 200 \text{ Вт.}$$

При  $R = 20$  Ом:

$$I_2 = \frac{120}{20 + 10} = 4 \text{ А}; P = 16 \cdot 20 = 320 \text{ Вт.}$$

При  $R = 10$  Ом:

$$I_3 = \frac{120}{10 + 10} = 6 \text{ А}; P = 36 \cdot 10 = 360 \text{ Вт.}$$

При  $R = 5$  Ом:

$$I_4 = \frac{120}{5 + 10} = 8 \text{ А}; P = 64 \cdot 5 = 320 \text{ Вт.}$$

Из приведенного расчета видим, что наибольшая мощность во внешней цепи 360 Вт будет при сопротивлении нагрузки, равном внутреннему сопротивлению источника энергии, т. е. при  $R = R_i = 10$  Ом.



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. По каким действиям можно судить о работе электрического тока?
2. В каких единицах измеряется работа электрического тока?
3. Что называется электрической мощностью и в каких единицах она измеряется?
4. При каких условиях источник электрической энергии отдает приемнику наибольшую мощность?



### ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

---

1. Мощность электрического двигателя равна 3 кВт. Определите ток в обмотке этого двигателя, если напряжение сети составляет 380 В.
2. Электродвигатель, подключенный к сети напряжением 220 В, потребляет ток 6 А. Рассчитайте мощность двигателя и количество энергии, которую он потребляет за 6 ч работы.

## 2.7. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

---

Источник электрической энергии преобразует механическую, химическую, тепловую и другую энергию в электрическую. Мощность, отдаваемая источником энергии во внешнюю цепь, является полезной ( $P_2$ ), а мощность, получаемая им извне (от источника механической, химической и других видов энергии), — потребляемой ( $P_1$ ).

Приемник электрической энергии, потребляя энергию из сети источника электрической энергии, преобразует ее в энергию другого вида.

В соответствии с законом сохранения энергии полезная мощность источника или приемника электрической энергии меньше потребляемой им, т. е.  $P_2 < P_1$ , так как в процессе работы источника или приемника неизбежно происходит потеря энергии. В преобразователях энергии, например двигателях, происходит потеря энергии в результате нагрева проводов обмоток протекающими в них токами, перемagnetичивания стали, вихревых токов и т. д.

Для оценки энергетических показателей источника или приемника электрической энергии служит **коэффициент полезного действия** (КПД), равный отношению полезной мощности источника или приемника к мощности, потребляемый им:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P'}$$

где  $\Delta P$  — мощность, расходуемая на преодоление потерь в источнике или приемнике энергии.

### **!** Запомните

КПД источника или приемника электрической энергии тем выше, чем меньше потери в нем. Например, КПД трансформатора достаточно высок и составляет 95—98 %, а КПД асинхронных двигателей — 70—95 %.

### **?** КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какая мощность источника электрической энергии будет полезной, а какая — потребляемой?
2. От каких энергетических показателей зависит КПД источника, приемника?

## **2.8.** ЗАКОН ДЖОУЛЯ – ЛЕНЦА

Русский ученый Э. Ленц и английский физик Дж. Джоуль одновременно и независимо друг от друга установили, что *при прохождении электрического тока по проводнику количество теплоты, выделяемое проводником, прямо пропорционально квадрату силы*

тока, сопротивлению проводника и времени, в течение которого электрический ток протекал по проводнику.

Эта зависимость называется **законом Джоуля — Ленца**, который можно записать следующим образом:

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

где  $Q$  — количество теплоты, развиваемое током, Дж;  $I$  — сила тока, протекающего по проводнику, А;  $R$  — сопротивление проводника, Ом;  $t$  — время, в течение которого ток протекал по проводнику, с.

Используя формулу закона Ома, можно записать

$$Q = \frac{U^2 t}{R} = U I t.$$

Нагревание проводников электрическим током широко используется для практических целей в промышленности и быту. На этом явлении основано устройство электрических ламп накаливания, электронагревательных приборов, электрических печей, многих типов измерительной и медицинской аппаратуры и т. д.

## **?** КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит суть закона Джоуля — Ленца? Сформулируйте его.
2. Каково практическое применение теплового действия электрического тока?

## **2.9.** ХИМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

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

При прохождении электрического тока через электролит на электродах выделяются определенные количества веществ, содержащихся в виде химического соединения в электролите. Зависимость выделенного вещества от силы тока устанавливается **первым законом Фарадея**, который сформулирован следующим образом.

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

Один и тот же ток, проходя одинаковое время через различные электролиты, выделяет на электродах различное количество вещества. Количество вещества в миллиграммах, выделяемое на электроде током в 1 А в течение 1 с, называется **электрохимическим эквивалентом** и обозначается буквой  $\alpha$ .

Закон Фарадея выражается формулой

$$M = \alpha It = \alpha q,$$

где  $M$  — количество вещества, мг;  $\alpha$  — электрохимический эквивалент;  $I$  — ток, А;  $t$  — время, с;  $q$  — количество электричества, К.

Необходимо отметить, что количество вещества, выделяющегося в результате электролиза, не зависит от формы гальванической ванны, концентрации раствора, температуры.

Электролиз нашел широкое применение в технике в виде покрытия металлов слоем другого металла (гальваностегия), получения копий с предметов (гальванопластика), рафинирования (очистке) металлов и др.

Явление электролиза представляет опасность для ряда подземных сооружений. Под действием электролиза блуждающими токами могут быть разрушены броня кабелей, водопроводных и газовых труб и других металлических сооружений. Главнейшим источником этих токов является электрооборудование транспорта — трамваев и электрифицированных железных дорог. Особенно вредно воздействие блуждающих токов на подземные телефонные кабели.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. В чем состоит суть закона Фарадея? Сформулируйте его.
2. Какие вещества называют электролитами или проводниками второго рода?
3. Что называется электрохимическим эквивалентом?
4. Какую опасность представляет электролиз для промышленности?



## ТЕМЫ ДОКЛАДОВ И РЕФЕРАТОВ

---

1. Использование теплового действия электрического тока в промышленности.
2. Техническое применение электролиза.
3. Электрические нагревательные приборы.
4. Термозлектричество. Термопары.
5. Применение законов Кирхгофа для расчета электрических цепей.

# ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

**К** В результате изучения данной главы вы должны:

■ **уметь:**

- находить параметры элементов магнитной цепи по их характеристикам;
- применять закон полного тока;
- определять индуцированную ЭДС;
- определять индуктивность катушки;

■ **знать:**

- параметры, характеризующие магнитное поле;
- элементы магнитных цепей;
- уравнение закона полного тока;
- воздействие магнитного поля на проводник с током;
- закон электромагнитной индукции;
- величину и направление ЭДС самоиндукции;
- взаимную индукцию и применение этого явления в промышленности;
- вихревые токи;
- области применения магнитных полей в технике.

## 3.1. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

### 3.1.1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МАГНИТНОМ ПОЛЕ

**→** **Магнитным полем** называется особый, отличный от вещества, вид материи, через которую передается действие магнита на другие тела.

Магнитное поле возникает в пространстве, окружающем движущиеся электрические заряды и постоянные магниты. Оно воз-

действует только на движущиеся заряды. Под влиянием электромагнитных сил движущиеся заряженные частицы отклоняются от своего первоначального пути в направлении, перпендикулярном полю.

Магнитное и электрические поля неразрывны и образуют совместно единое **электромагнитное поле**. Всякое изменение электрического поля приводит к появлению магнитного поля, и, наоборот, всякое изменение магнитного поля сопровождается возникновением электрического поля. Электромагнитное поле распространяется со скоростью света, т. е. 300 000 км/с.

Общеизвестно действие постоянных магнитов и электромагнитов на ферромагнитные тела, существование и неразрывное единство полюсов магнитов и их взаимодействие (разноименные полюсы притягиваются, одноименные отталкиваются). По аналогии с магнитными полюсами Земли полюсы магнитов называют **северным** и **южным**.

Магнитное поле наглядно изображается **магнитными силовыми линиями**, которые задают направление магнитного поля в пространстве (рис. 3.1). Эти линии не имеют ни начала, ни конца, т. е. являются **замкнутыми**.

Силовые линии магнитного поля прямолинейного проводника представляют собой концентрические окружности, охватывающие провод. Чем сильнее ток, тем сильнее магнитное поле вокруг провода. При удалении от провода с током магнитное поле ослабевает.

В пространстве, окружающем магнит или электромагнит, за положительное направление магнитных силовых линий условно принято направление **от северного полюса к южному**. Чем ин-

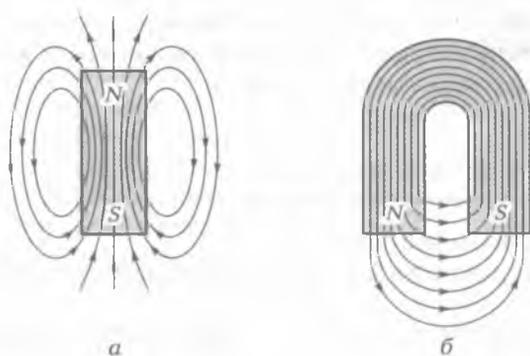


Рис. 3.1. Магнитное поле магнитов:

а — прямого; б — подковообразного

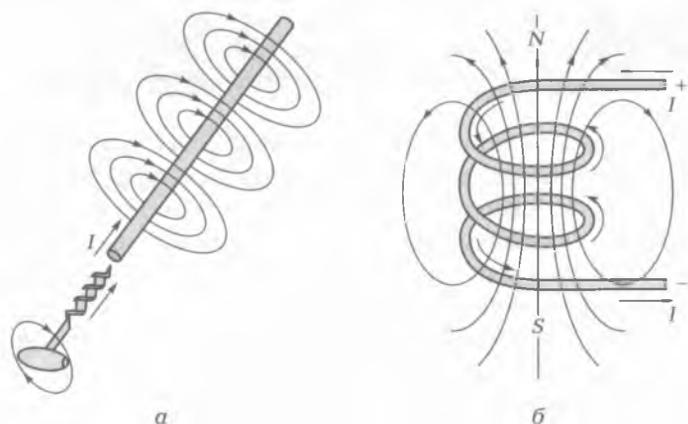


Рис. 3.2. Магнитное поле:  
*а* — прямого провода; *б* — индуктивной катушки

тенсивнее магнитное поле, тем выше плотность силовых линий. Направление магнитных силовых линий определяется **правилом буравчика**.

Если ввинчивать винт по направлению тока, то магнитные силовые линии будут направлены по ходу винта (рис. 3.2, *а*).

Для получения более сильного магнитного поля применяют индуктивные катушки с обмоткой из проволоки. В этом случае магнитные поля отдельных витков индуктивной катушки складываются и их силовые линии сливаются в общий магнитный поток.

Магнитные силовые линии выходят из индуктивной катушки на том конце, где ток направлен против хода часовой стрелки, т. е. этот конец является северным магнитным полюсом (рис. 3.2, *б*). При изменении направления тока в индуктивной катушке изменится и направление магнитного поля.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое магнитное поле?
2. Может ли существовать магнитное поле независимо от электрического поля?
3. Каким правилом определяются направления силовых магнитных линий?
4. Знаете ли вы, как выглядят силовые линии магнитного поля прямолинейного проводника? Нарисуйте их.

### 3.1.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

**Магнитная индукция.** Интенсивность магнитного поля характеризуется магнитной индукцией  $B$ . Чем сильнее магнитное поле, созданное постоянным магнитом или электромагнитом, тем большую индукцию оно имеет. Направление действия электромагнитной силы  $F$  на проводник определяется **правилом левой руки** (рис. 3.3).

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 действия электромагнитной силы.

По этой силе можно судить об **интенсивности магнитного поля**, т. е. о его **магнитной индукции**. Если на проводник длиной 1 м с током 1 А, расположенный перпендикулярно магнитным линиям в равномерном магнитном поле, действует сила в 1 Н, то магнитная индукция такого поля равна 1 Тл (тесла).

#### **!** Запомните

Магнитная индукция — векторная величина: в каждой точке поля вектор магнитной индукции направлен по касательной к магнитным силовым линиям.

**Магнитный поток.** Величина, измеряемая произведением магнитной индукции  $B$  на площадь  $S$ , перпендикулярную вектору магнитной индукции, называется **магнитным потоком**  $\Phi$ :

$$\Phi = BS.$$

Магнитную индукцию выражают в теслах, а площадь — в квадратных метрах, поэтому единица магнитного потока — вебер:

$$1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2.$$

**Магнитодвижущая сила.** Способность тока возбуждать магнитное поле характеризуется **магнитодвижущей силой** (МДС), действующей вдоль замкнутой магнитной силовой линии. Магнитодвижущая сила равна току, создающему магнитное поле, и выражается в амперах.

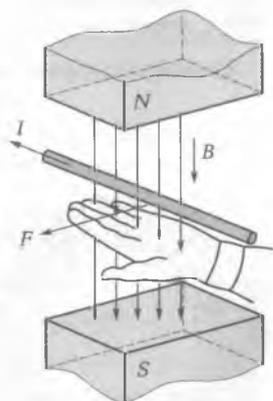


Рис. 3.3. Определение направления действия электромагнитной силы на проводник с током согласно правилу левой руки

Для проводника с током  $I$  МДС равна току  $I$ . В общем случае, когда замкнутый контур магнитной силовой линии охватывает несколько токов, суммарная МДС равна сумме токов.

Для катушки с числом витков  $w$  и током  $I$  (рис. 3.4) МДС равна:

$$\sum I = Iw.$$

**Напряженность магнитного поля.** Магнитодвижущая сила, приходящаяся на единицу длины магнитной силовой линии, называется **напряженностью магнитного поля  $H$**  и выражается в амперах на метр (А/м).

Если физические условия вдоль всей длины  $l$  магнитной линии одинаковы, то

$$H = \frac{\sum I}{l}.$$

Например, вокруг прямолинейного проводника с током  $I$  линии магнитного поля представляют собой концентрические окружности переменного радиуса  $x$ , длина каждой из которых  $l = 2\pi x$ . В этом случае напряженность

$$H = \frac{I}{2\pi x}.$$

### **!** Запомните

По мере удаления от проводника напряженность поля снижается.

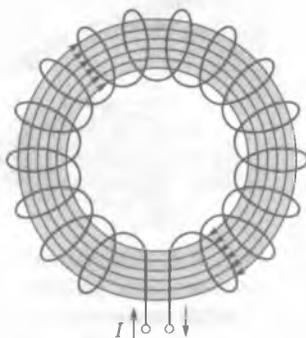


Рис. 3.4. Торoidalная катушка

**Магнитная проницаемость.** Магнитная индукция зависит не только от силы тока, проходящего по прямолинейному проводнику или индуктивной катушке, но и от свойств среды, в которой создается магнитное поле. Величиной, характеризующей магнитные свойства среды, служит **абсолютная магнитная проницаемость  $\mu_a$** . Она определяется отношением магнитной индукции  $B$  к напряженности магнитного поля  $H$  и измеряется в генри на метр (Гн/м):

$$\mu_a = \frac{B}{H}.$$

Абсолютная магнитная проницаемость вакуума  $\mu_a = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м. Для воздуха и других неферромагнитных материалов она незначительно отличается от магнитной проницаемости вакуума и при технических расчетах принимается равной  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м. Так как абсолютная магнитная проницаемость для вакуума и указанных ранее материалов практически одинакова, то  $\mu_a$  называется **магнитной постоянной**  $\mu_0$ .

Абсолютная магнитная проницаемость  $\mu_a$  ферромагнитных материалов непостоянна и во много раз превышает магнитную проницаемость вакуума.

Число, показывающее, во сколько раз абсолютная магнитная проницаемость  $\mu_a$  ферромагнитного материала больше магнитной постоянной  $\mu_0$ , называется **относительной магнитной проницаемостью**  $\mu$ , или (сокращенно) магнитной проницаемостью:

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0}.$$

**Пример 3.1.** Сталь при определенных условиях обладает абсолютной магнитной проницаемостью  $\mu_a$ , равной 0,0008792 Гн/м. Определить относительную магнитную проницаемость  $\mu$  этой стали.

*Решение*

Относительная магнитная проницаемость

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0} = \frac{0,0008792}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = 700.$$

Семейство кривых намагничивания технически чистого железа (1), электротехнической стали (2) и пермаллоя (3) приведено на рис. 3.5. Эти материалы широко применяются в трансформаторах, электротехнических машинах и аппаратах.

Как видно из кривых намагничивания (см. рис. 3.5), способность материалов намагничиваться (их магнитная проницаемость) в сла-

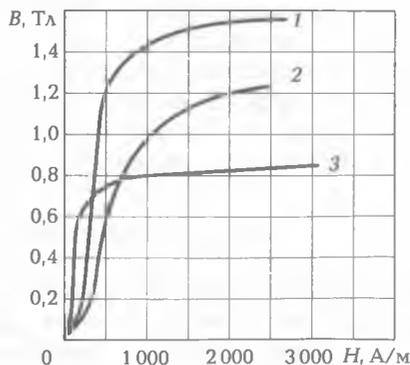


Рис. 3.5. Семейство кривых намагничивания:

1 — технически чистого железа; 2 — электротехнической стали; 3 — пермаллоя

бых полях велика, а затем с ростом индукции постепенно уменьшается.

Магнитная проницаемость магнитных материалов — величина изменяющаяся, зависящая от степени их намагничивания.

При одной и той же напряженности магнитного поля (см. рис. 3.5) магнитная индукция в чистом железе больше, чем в электротехнической стали. Это объясняется тем, что магнитная проницаемость чистого железа больше магнитной проницаемости электротехнической стали.

**Пример 3.2.** Напряженность магнитного поля катушки  $H = 750$  А/м, абсолютная проницаемость сердечника  $\mu_a = 0,0008792$  Гн/м. Определить магнитную индукцию сердечника.

*Решение*

Магнитная индукция сердечника

$$B = \mu_a H = 0,0008792 \cdot 750 = 0,65 \text{ Тл.}$$

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. От каких величин зависит напряженность магнитного поля?
2. В каких единицах измеряется магнитная индукция?
3. Что называется относительной магнитной проницаемостью  $\mu$ ?
4. От каких параметров зависит магнитная индукция?
5. В каких единицах измеряется магнитный поток?

## ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Магнитная индукция электротехнической стали составляет 1,5 Тл, площадь поперечного сечения сердечника, изготовленного из этой стали, — 0,003 м<sup>2</sup>. Определите магнитный поток, пронизывающий сердечник.
2. Найдите магнитную индукцию в сердечнике из альсифера магнитной проницаемостью 10,5, если он помещен в магнитное поле напряженностью 1 000 А/м.
3. Рассчитайте магнитный поток, проходящий в куске никеля, помещенном в однородное магнитное поле напряженностью 1 200 А/м. Площадь поперечного сечения куска никеля составляет 25 см (относительная магнитная проницаемость никеля  $\mu = 300$ ).

### 3.1.3. ПРОВОДНИК С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Энергия, заключенная в магнитном поле, может проявлять себя в виде электромагнитных сил, которые возникают при взаимодействии магнитного поля с движущимися электрическими зарядами.

Если поместить в магнитное поле проводник с током  $I$ , то между электронами, проходящими по проводнику, и магнитным полем возникнут электромагнитные силы, которые, складываясь, образуют результирующую силу  $F$ , стремящуюся вытолкнуть проводник из магнитного поля. Электромагнитная сила  $F$ , действующая на проводник с током, находящийся в магнитном поле и расположенный перпендикулярно направлению поля, равна произведению силы тока  $I$ , индукции магнитного поля  $B$  и длины проводника  $l$ :

$$F = BIl.$$

Если проводник расположен под углом  $\alpha$  к силовым магнитным, то сила,  $H$ ,

$$F = BIl \sin \alpha.$$

Направление действия силы  $F$  обычно определяют по правилу левой руки (см. рис. 3.3). В результате воздействия таких механических сил при одинаковом направлении тока лежащие рядом проводники будут **притягиваться** друг к другу (рис. 3.6, а), при разном направлении тока — **отталкиваться** (рис. 3.6, б).

На явлении взаимодействия магнитного поля и проводника с током основано устройство различных электрических машин и приборов, например измерительных приборов магнитоэлектрической системы.

Особенно большие силы между проводниками возникают в электрических цепях при коротких замыканиях.

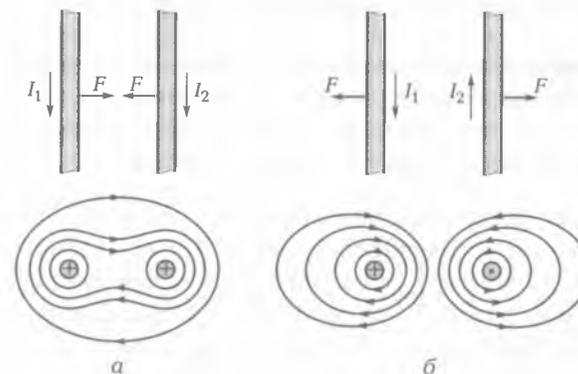


Рис. 3.6. Взаимодействие двух проводников с током:  
а — при одинаковом направлении тока; б — при разном направлении тока

**Пример 3.3.** Определить, с какой силой магнитное поле, созданное током, действует на проводник, если магнитная индукция поля  $B = 1,5$  Тл, рабочая длина проводника  $l = 0,5$  м и по нему протекает ток  $I = 0,4$  А.

*Решение*

Сила, действующая на проводник:

$$F = BIl = 1,5 \cdot 0,4 \cdot 0,5 = 0,3 \text{ Н.}$$



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково правило определения направления силы, действующей на проводник с током, помещенный в магнитное поле?
2. От каких параметров зависит сила, действующая на проводник с током, помещенный в магнитное поле?
3. Будет ли действовать сила на проводник, помещенный в магнитное поле параллельно силовым магнитным линиям?



## ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Определите магнитную индукцию поля, если оно действует на проводник с силой 6 Н. Рабочая длина проводника, помещенного в магнитное поле, составляет 0,4 м, а ток, протекающий по нему, — 15 А.
2. Вычислите, с какой силой магнитное поле, созданное проводником с током, действует на проводник, если магнитная индукция поля равна 1,5 Тл, рабочая длина проводника — 0,6 м и по нему протекает ток 5 А.

### 3.1.4. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ



**Магнитной цепью** называется совокупность источника МДС (электромагнита или постоянного магнита), а также ряда тел и сред (магнитопровода), по которым замыкается основная часть магнитных линий созданного поля.

Магнитная цепь электромагнитного реле (рис. 3.7) состоит из трех участков: сердечника 2, якоря 4 и воздушного зазора 6. По замкнутому контуру, образованному этими участками, проходит магнитный поток 3, создаваемый током индуктивной катушки 1. При переходе через воздушные зазоры, разделяющие сердечник и якорь, часть магнитного потока замыкается по воздуху, т. е. не проходит через якорь, — возникает поток рассеяния 5.

При расчете магнитной цепи могут быть поставлены две задачи:

1) **прямая**, когда известны геометрические размеры и магнитные свойства материала магнитопровода, а также значение магнитного потока  $\Phi$  — определяются магнитодвижущая сила и ток  $I$  в витках обмотки;

2) **обратная**, когда задается МДС, геометрические размеры и материалы магнитопровода — определяется магнитный поток  $\Phi$ .

Расчет магнитных цепей производится на основе закона полного тока с помощью уравнений магнитного состояния. Как и в электрических цепях, здесь используют уравнения магнитного состояния.

**Узловое уравнение** — алгебраическая сумма магнитных потоков, сходящихся в любом узле (поток через замкнутую поверхность), всегда равна нулю:

$$\sum \Phi = 0.$$

**Контурное уравнение** — алгебраическая сумма падений магнитных напряжений в любом замкнутом контуре магнитной цепи равна алгебраической сумме МДС в контуре:

$$\sum U_{\mu} = \sum wI.$$

**Падение магнитного напряжения** на заданном участке магнитной цепи определяют как произведение напряженности магнитного поля на длину участка цепи (или магнитного сопротивления участка на магнитный поток) и выражают в амперах:

$$U_{\mu} = Hl = \frac{\Phi l}{\mu_0 \mu_n S} = R_{\mu} \Phi,$$

где  $R_{\mu}$  — магнитное сопротивление участка,  $R_{\mu} = \frac{l}{\mu_0 \mu_n S}$ .

Например, для магнитной схемы, содержащей источник МДС и два участка с магнитными сопротивлениями  $R_{\mu_m}$  и  $R_{\mu_v}$  (рис. 3.8), можно записать следующее уравнение магнитного состояния:

$$wI = U_{\mu_m} + U_{\mu_v},$$

где  $U_{\mu_m}$  — магнитное напряжение на участке ферромагнетика;  
 $U_{\mu_v}$  — магнитное напряжение на участке воздушного зазора.

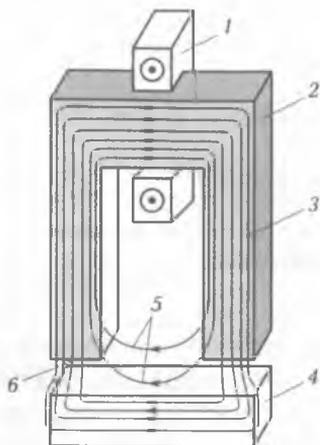


Рис. 3.7. Магнитная цепь электромагнитного реле:

1 — индуктивная катушка; 2 — сердечник; 3 — магнитный поток; 4 — якорь; 5 — поток рассеяния; 6 — воздушный зазор

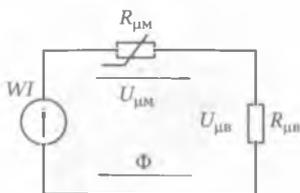


Рис. 3.8. Эквивалентная схема магнитной цепи

Аналогия электрических и магнитных цепей формальна. По своему внутреннему содержанию они существенно различаются: ЭДС источника существует и остается неизменной при любом режиме электрической цепи (при холостом ходе, номинальном режиме и коротком замыкании), МДС всегда связана с одновременным существованием магнитного потока. Тем не менее аналогия позволяет для каждой

магнитной цепи составить эквивалентную схему замещения.

**Области применения магнитных полей** в технике разнообразны и все более расширяются. Магнитные поля используют в электрических машинах и трансформаторах, электрических аппаратах, измерительных приборах и других электротехнических устройствах. Магниты необходимы в магнитофонах и проигрывателях, радиоприемниках и телевизорах, электробритах и пылесосах.

Мощные магнитные поля необходимы в современных энергетических и физических установках: например, для формирования потока заряженных частиц в ускорителях, удержания плазмы в камерах магнитных ловушек в физических установках. Сильное магнитное поле создают в *магнитогидродинамических генераторах*, с которыми связано прогрессивное направление в развитии электроэнергетики.

Электромагниты являются элементами конструкций многих технологических установок и механизмов. Так, для подъема и транспортировки ферромагнитных материалов применяют *подъемные электромагниты*; для пуска, торможения и переключения скоростей в кинематических цепях станков широкое распространение получили *электромагнитные муфты*; для удержания деталей на плоскошлифовальных станках — *электромагнитные плиты*; для извлечения стальных и чугунных тел из массы сыпучего обрабатываемого материала — *магнитные сепараторы*; для управления потоками газов и жидкостей — *электромагнитные краны и клапаны*. Электромагнитное поле используют и непосредственно в технологических процессах.



### Запомните

- Расчет магнитных цепей с ферромагнитными материалами аналогичен расчету электрических цепей постоянного тока.
- При расчете магнитных цепей, как и электрических, используют узловые и контурные уравнения.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называют магнитной цепью?
2. В чем различие между уравнением участка электрической ветви и его аналогом для магнитной цепи?
3. Как определить магнитное сопротивление участка магнитной цепи?

## 3.2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

### 3.2.1. ЗАКОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

В основе работы многих электротехнических устройств (электро-механических генераторов, трансформаторов) лежит явление электромагнитной индукции, открытое М. Фарадеем в 1831 г. Несколько позже российский академик Э. Ленц определил направление электродвижущей силы, а количественную зависимость индуцированной ЭДС от скорости изменения магнитного потока установил Дж. Максвелл.

Явление **электромагнитной индукции** заключается в том, что изменение магнитного поля вокруг проводника, связанное с пересечением проводника магнитными силовыми линиями, вызывает появление ЭДС в этом проводнике. При этом безразлично, будет ли изменяться магнитное поле относительно проводника или проводник будет перемещаться в магнитном поле. Значение индуцированной ЭДС определяется **законом электромагнитной индукции М. Фарадея**. Он формулируется следующим образом.



*Индуцированная ЭДС прямо пропорциональна индукции  $B$ , активной длине проводника  $l$  и скорости  $v$  его перемещения в направлении, перпендикулярном линиям магнитного поля:*

$$e = Blv \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  — угол между направлениями скорости  $v$  и поля. Если  $\alpha = 90^\circ$  (что бывает часто), то  $e = Blv$ .

Направление ЭДС определяют согласно **правилу правой руки** (рис. 3.9).

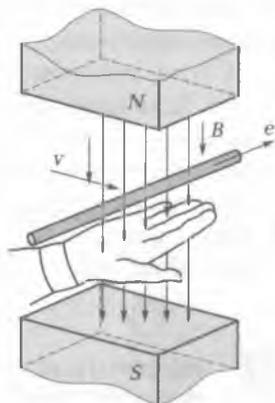


Рис. 3.9. Определение направления ЭДС согласно правилу правой руки

Если поставить правую руку так, чтобы магнитные линии входили в ладонь, а отставленный большой палец указывал направление движения проводника, то вытянутые четыре пальца укажут направление индуцируемой ЭДС.

При изменении магнитного потока, охватываемого замкнутым контуром, в нем индуцируется ЭДС

$$e = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

где  $\Delta t$  — промежуток времени, в течение которого магнитный поток изменяется на  $\Delta \Phi$ .

В катушке с  $w$  витками  $e = -w \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ . Знак «-» отражает **правило Ленца**:

Индукцированная ЭДС имеет такое направление, при котором созданный ею ток противодействует причине, вызвавшей появление ЭДС, т.е. противодействует изменению магнитного потока.

### **!** Запомните

- Явление электромагнитной индукции широко используется в различных электрических машинах и устройствах. На этом принципе основано устройство электрических генераторов, двигателей и трансформаторов.
- Направление ЭДС определяют согласно правилу правой руки.
- Индуцирование ЭДС в проводнике происходит независимо от того, включен ли он в какую-либо электрическую цепь или нет. Если присоединить концы этого проводника к какому-либо приемнику электрической энергии, то под влиянием разности потенциалов на концах проводника по замкнутой цепи потечет электрический ток.
- Индуцируемая ЭДС стремится противодействовать причине, ее вызывающей.

### **?** КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит суть закона электромагнитной индукции? Сформулируйте его.
2. От каких параметров зависит ЭДС индукции?

3. Как определить направление индуцированной ЭДС в проводнике?
4. Где в технике используется явление электромагнитной индукции?

### 3.2.2. САМОИНДУКЦИЯ. ИНДУКТИВНОСТЬ

При изменении тока в проводнике, витке или индуктивной катушке изменяется магнитный поток, создаваемый этим током. Изменение магнитного потока индуцирует в проводнике (витке, индуктивной катушке) ЭДС, действие которой направлено на поддержание предшествующего состояния поля. Такое явление называется *самоиндукцией*. Направление ЭДС самоиндукции определяется по **правилу Ленца**.

Электродвижущая сила самоиндукции имеет всегда такое направление, при котором она препятствует изменению вызвавшего ее тока.

Следовательно, при возрастании тока в проводнике (индуктивной катушке) индуцированная в ней ЭДС самоиндукции будет направлена против тока, т. е. будет препятствовать его возрастанию (рис. 3.10, а), и, наоборот, при уменьшении тока в проводнике (индуктивной катушке) возникает ЭДС самоиндукции, совпадающая по направлению с током, т. е. препятствующая его убыванию (рис. 3.10, б).

Способность различных проводников (индуктивных катушек) индуцировать ЭДС самоиндукции оценивается **индуктивностью**  $L$ . Единица индуктивности — генри (Гн). Такой индуктивностью обладает проводник, в котором возникает ЭДС самоиндукции, равная 1 В, при изменении тока на 1 А за 1 с:

$$e_L = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}.$$

Знак «-» в формуле отражает правило Ленца.

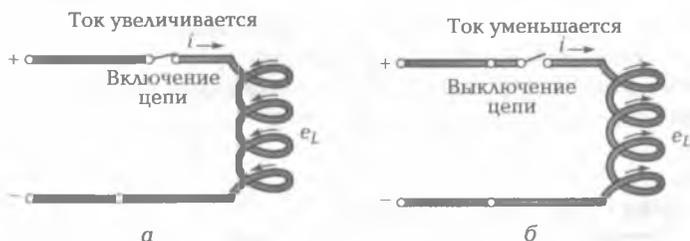


Рис. 3.10. Направление ЭДС самоиндукции в индуктивной катушке:  
а — при увеличении тока; б — при уменьшении тока

На практике индуктивность часто измеряют в тысячных долях генри — миллигенри (мГн) и в миллионных долях генри — микрогенри (мкГн).

Значение индуктивности  $L$  зависит от конструкции элементов цепи. Так, для индуктивной катушки с числом витков  $w$ , магнитопроводом длины  $l$ , сечения  $S$  и магнитной проницаемостью  $\mu$  индуктивность

$$L = \frac{w^2 \mu_a \delta}{l}$$

Если катушки своими полями не влияют друга на друга, то при **последовательном соединении** индуктивных катушек с индуктивностями  $L_1, L_2, L_3 \dots$  общая индуктивность

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + \dots$$

При **параллельном соединении**

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots$$

### **!** Запомните

- Если ток в индуктивной катушке не изменяется, то ЭДС самоиндукции не возникает.
- Явление самоиндукции в тех или иных проводниках характеризуется индуктивностью  $L$ .
- Индуктивность — это размерный коэффициент пропорциональности между скоростью изменения тока во времени и индуцируемой при этом ЭДС.

### **?** КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. При каких условиях возникает ЭДС самоиндукции?
2. В каких единицах измеряется индуктивность?
3. Как изменится ЭДС самоиндукции, если скорость изменения тока, проходящего через индуктивную катушку, возросла?

### **П** ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Определите индуктивность индуктивной катушки, если при скорости изменения тока  $2 \text{ А/с}$  в ней индуцируется ЭДС самоиндукции  $1,5 \text{ В}$ .

2. В индуктивной катушке ток равномерно изменился на 20 мА за 0,01 с. Рассчитайте ЭДС самоиндукции, если индуктивность индуктивной катушки составляет 5 мГн.
3. В индуктивной катушке, обладающей индуктивностью 12 мГн, протекает ток, сила которого изменяется за 2 с на 10 мА. Вычислите ЭДС самоиндукции, возникающей в индуктивной катушке.

### 3.2.3. ВЗАИМОИНДУКЦИЯ

Если две индуктивные катушки находятся на некотором расстоянии друг от друга (рис. 3.11) и по одной из них (1) проходит изменяющийся ток, то часть магнитного потока, возбуждаемая этим током, пронизывает витки второй индуктивной катушки (2) и в ней возникает ЭДС, называемая **ЭДС взаимои́ндукции**.

Если два замкнутых контура или две индуктивные катушки 1 и 2 (см. рис. 3.11) сцеплены с общим магнитным потоком  $\Phi_{12}$ , то такие контуры и индуктивные катушки называют **индуктивно-** или **магнитно-связанными**.

→ Под действием ЭДС взаимои́ндукции в замкнутой цепи второй индуктивной катушки возникает электрический ток взаимои́ндукции. Он вызывает появление магнитного поля, которое пронизывает витки первой индуктивной катушки, в результате чего в ней также возникает ЭДС взаимои́ндукции. Такое явление называется **взаимои́ндукцией**.

Величина ЭДС взаимои́ндукции, возникающей во второй индуктивной катушке, зависит от размеров, расположения индуктивных катушек, магнитной проницаемости их сердечников, а также скорости изменения силы тока  $\frac{\Delta i}{\Delta t}$  в первой индуктивной катушке. Эту зависимость можно выразить формулой

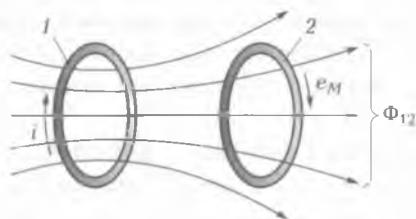


Рис. 3.11. Взаимои́ндукция:  
1, 2 — индуктивно-связанные катушки

$$e_{\text{м}} = -M \frac{\Delta i}{\Delta t},$$

где  $M$  — величина, зависящая от размеров индуктивных катушек, их расположения и магнитной проницаемости среды между индуктивными катушками. Она называется **взаимной индуктивностью** и измеряется в генри (Гн). Знак «-» в этой формуле показывает, что ЭДС взаимоиндукции противодействует причине, вызывающей ее.

Взаимоиндукция дает возможность связывать посредством магнитного поля различные электрические цепи. Явление взаимоиндукции широко используют в трансформаторах, радиотехнических устройствах и устройствах автоматики.



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какое явление называется взаимоиндукцией?
2. При каких условиях возникает ЭДС взаимоиндукции?
3. Какие катушки называют магнитносвязанными?
4. В каких единицах измеряется взаимная индуктивность?

### 3.2.4. ВИХРЕВЫЕ ТОКИ

Изменяющийся магнитный поток способен индуцировать ЭДС не только в проводах или витках индуктивных катушек, но и в массивных стальных сердечниках, кожухах и других металлических деталях электротехнических установок. Эти ЭДС являются причиной появления индуцированных токов, которые действуют в массивных металлических деталях электротехнических устройств, замыкаясь накоротко в их толще. Такие токи получили название **вихревых токов**.

Природа вихревых токов такая же, как и токов, индуцированных в обычных проводах или индуктивных катушках. Благодаря очень малому сопротивлению массивных проводников вихревые токи даже при небольшой индуцированной ЭДС достигают очень больших значений, вызывая чрезмерное нагревание этих проводников.

**Способы уменьшения вредного действия вихревых токов.** В электрических машинах и аппаратах вихревые токи обычно нежелательны, так как они вызывают нагрев металлических сердечников, создают потери энергии (так называемые потери от вихревых токов), снижают КПД электрических машин и аппаратов и ока-

зывают согласно правилу Ленца размагничивающее действие. Для уменьшения вредного действия вихревых токов применяют два основных способа.

1. Сердечники электрических машин и аппаратов выполняют из отдельных стальных листов толщиной 0,35—1,0 мм, изолированных один от другого слоем изоляции (лаковой пленкой, окалиной, образующейся при отжиге листов, и пр.). Благодаря этому преграждается путь распространению вихревых токов.

2. В состав электротехнической стали, из которой изготавливают сердечники электрических машин и аппаратов, вводят 1—5% кремния, что обеспечивает повышение ее электрического сопротивления. Благодаря этому достигается снижение силы вихревых токов, протекающих по сердечникам электрических машин и аппаратов.

**Использование вихревых токов.** Вихревые токи используют для плавки металлов, с их помощью нагревают металлические детали при сварке, наплавке и пайке, а также осуществляют поверхностный нагрев, необходимый для закалки металлических изделий.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Что является причиной появления вихревых токов?
2. Какие способы уменьшения вредного действия вихревых токов вам известны?
3. Где можно найти полезное применение вихревым токам?



## ТЕМЫ ДОКЛАДОВ И РЕФЕРАТОВ

---

1. Природа магнетизма.
2. Намагничивание ферромагнитных материалов.
3. Применение электромагнитной индукции в технике.
4. Полезное использование вихревых токов в технике.
5. Электромагниты и их применение.

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**К**

В результате изучения данной главы вы должны:

■ **уметь:**

- находить параметры переменного тока и напряжения по их графической форме представления;
- рассчитывать простые цепи переменного тока;
- строить векторные диаграммы неразветвленных цепей переменного тока;
- определять реактивную, активную и полную мощности и коэффициент мощности в цепях переменного тока;
- применять соотношения между фазными и линейными напряжениями и токами для расчета трехфазной цепи;
- применять соотношения для токов, напряжений и мощностей при переключении обмоток нагрузки со «звезды» на «треугольник» и при обратном переключении;

■ **знать:**

- параметры и формы представления переменного тока и напряжения;
- электрические схемы включения элементов в цепи переменного тока;
- закон Ома для цепей переменного тока;
- условия возникновения и особенности резонанса напряжения и тока в цепях переменного тока;
- связь между активной, реактивной и полной мощностью;
- способы повышения коэффициента мощности;
- векторные диаграммы для расчета простых электрических цепей;
- способы получения токов и напряжений в трехфазной системе;
- элементы трехфазной системы;

- схемы соединения потребителей и генератора «звездой» и «треугольником»;
- схемы измерения активной мощности в трехфазной цепи;
- область применения трехфазной системы в электротехнической промышленности.

## 4.1. ОДНОФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### 4.1.1. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

→ **Переменным током** называется такой электрический ток, который периодически изменяется по величине и направлению.

Для получения переменного тока используют электромашинные генераторы, работа которых основана на явлении электромагнитной индукции. Переменный ток имеет огромное практическое значение. Почти вся электроэнергия вырабатывается в виде энергии переменного тока.

Возможность получать переменный ток различного напряжения (высокого — для передачи энергии на большие расстояния, низкого — для питания различных потребителей), простота устройства генераторов и двигателей переменного тока, надежность их работы, удобство эксплуатации и высокие технические характеристики дали им широкое применение.

Наибольшее распространение получил **синусоидальный ток**. Изменение тока по синусоидальному закону происходит плавно, без скачков и резких перепадов, что благоприятно сказывается на работе электрических машин и аппаратов.

Временная диаграмма синусоидального тока приведена на рис. 4.1. Его мгновенное значение описывается формулой

$$i = I_m \sin(\omega t + \Psi),$$

где  $I_m$  — максимальное значение (амплитуда) тока;  $\omega$  — угловая частота;  $\Psi$  — начальная фаза (значение аргумента в начальный момент времени, т. е. при  $t = 0$ ).

Переменная ЭДС, переменное напряжение и переменный ток характеризуются периодом, частотой, мгновенным, максимальным и значениями, действующей величиной.

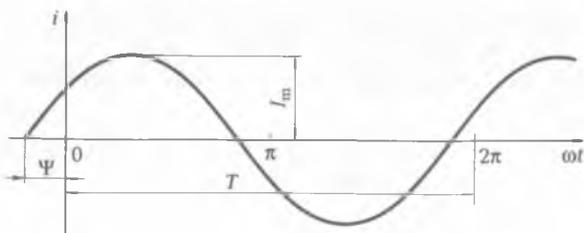


Рис. 4.1. Временная диаграмма синусоидального тока

**Период.** Время, в течение которого переменная ЭДС (напряжение или ток) совершает одно полное изменение по величине и направлению (один цикл), называется *периодом*. Период обозначается буквой  $T$  и измеряется в секундах (с).

**Частота.** Число полных изменений переменной ЭДС (напряжения или тока), совершаемых за 1 с, называется *частотой*. Частота обозначается буквой  $f$  и измеряется в герцах (Гц). При измерении больших частот пользуются единицами килogerц (кГц) и мегагерц (МГц):

$$1 \text{ кГц} = 1\,000 \text{ Гц}, \quad 1 \text{ МГц} = 1\,000 \text{ кГц} = 1\,000\,000 \text{ Гц}.$$

Чем больше частота переменного тока, тем короче период. Таким образом, частота — это величина, обратная периоду:

$$f = \frac{1}{T}.$$

При вращении витка в магнитном поле один его оборот соответствует  $360^\circ$ , или  $2\pi$  радиан. Угловая скорость вращения этого витка выражается в радианах в секунду (рад/с) и определяется отношением  $\frac{2\pi}{T}$ . Эта величина называется *угловой частотой* и обозначается буквой  $\omega$ :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f.$$

Угловая частота  $\omega$ , выраженная в радианах в секунду, больше частоты тока, выраженной в герцах, в  $2\pi$  раз.

**Мгновенное и максимальное значения.** Величины переменной ЭДС, силы тока, напряжения и мощности в любой момент времени называют *мгновенными значениями* этих величин, обозначают соответственно строчными буквами ( $e$ ,  $i$ ,  $u$ ,  $p$ ) и записывают следующим образом:

$$e = E_m \sin(\omega t + \Psi);$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \Psi);$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \Psi);$$

$$p = P_m \sin(\omega t + \Psi).$$

**Максимальным значением** (амплитудой) переменной ЭДС (напряжения или тока) называется та наибольшая величина, которой она достигает за один период. Максимальное значение электродвижущей силы обозначается  $E_m$ , напряжения —  $U_m$ , тока —  $I_m$ .

**Действующая величина.** Действующим значением переменного тока называется такая сила постоянного тока, которая, протекая через равное сопротивление и за одно и то же время, что и переменный ток, выделяет одинаковое количество теплоты.

*Электроизмерительные приборы (амперметр, вольтметр), включенные в цепь переменного тока, измеряют соответствующее действующее значение тока и напряжения.*

Для синусоидального переменного тока действующее значение меньше максимального в 1,41 раз, т. е. в  $\sqrt{2}$  раза:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m}{1,41} = I_m \cdot 0,707.$$

Аналогично действующие значения переменной ЭДС и напряжения меньше их максимальных значений в 1,41 раза:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{E_m}{1,41} = E_m \cdot 0,707;$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m}{1,41} = U_m \cdot 0,707.$$

**Пример 4.1.** Вольтметр, подключенный к зажимам электрической цепи, показывает действующее напряжение  $U = 36$  В. Вычислить максимальное значение (амплитуду) этого переменного напряжения.

*Решение*

Максимальное значение напряжения больше действующего в  $\sqrt{2}$  раз, поэтому:

$$U_m = U\sqrt{2} = 36 \cdot 1,41 \approx 50,8 \text{ В.}$$

**Сдвиг фаз.** При сопоставлении двух и более переменных синусоидальных величин (ЭДС, напряжения или тока) необходимо также

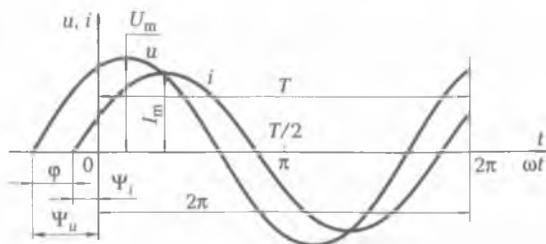


Рис. 4.2. Диаграмма изменения величин переменного тока и напряжения, не совпадающих по фазе

учитывать, что они могут изменяться во времени неодинаково и достигать своего максимального значения в разные моменты времени.

Графики изменения переменного тока  $i$  и напряжения  $u$ , не совпадающих по фазе, показаны на рис. 4.2.

**Сдвиг фаз** между напряжением и током есть алгебраическая величина, определяемая путем вычитания начальной фазы тока из начальной фазы напряжения:

$$\varphi = \Psi_u - \Psi_i$$

### ! Запомните

- Если  $\varphi > 0$ , то напряжение опережает ток по фазе.
- Если  $\varphi < 0$ , то напряжение отстает по фазе от тока.
- Если  $\varphi = 0$ , то ток и напряжение совпадают по фазе.

### ? КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется переменным током?
2. В каких единицах измеряется частота переменного тока?
3. Какое значение переменного тока наносят на шкалах амперметров и вольтметров?
4. Что такое сдвиг фаз между напряжением и током?

### П ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Развиваемая генератором в каждый момент времени ЭДС определяется формулой  $e = 36 \sin(314t + \pi/4)$ . Определите начальную фазу ЭДС и значение ее при  $t = 0,15$  с.

2. На зажимах генератора ЭДС, измеренная осциллографом, имеет синусоидальную форму, максимальное значение — 110 В, частоту — 400 Гц и начальную фазу —  $30^\circ$ . Напишите выражение для мгновенного значения ЭДС.
3. Определите максимальное значение переменного напряжения вольтметра, подключенного к зажимам цепи переменного тока, если этот вольтметр показывает 220 В.
4. В электрической цепи протекает переменный ток  $i = 284 \sin(314t + \pi/2)$ . Найдите действующее значение, частоту и начальную фазу тока.

#### 4.1.2. ВЕКТОРНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

При изучении и расчете цепей переменного тока удобно пользоваться векторными диаграммами, на которых синусоидальные ЭДС, напряжения и токи условно изображают с помощью векторов.

Векторы изображают неподвижными, с учетом сдвига по фазе и подразумевают, что они равномерно вращаются против часовой стрелки с угловой скоростью  $\omega$ . При таком вращении вектора его проекция на вертикальную ось изменяется во времени по закону синуса с учетом начальной фазы.

→ Совокупность векторов на плоскости, изображающих ЭДС напряжения и токи одной частоты, называют **векторной диаграммой**.

Векторные диаграммы двух токов, сдвинутых на  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $180^\circ$ , показаны на рис. 4.3, а — г соответственно. Применение этих диаграмм упрощает изучение и расчет цепей и вносит наглядность в рассматриваемые соотношения.

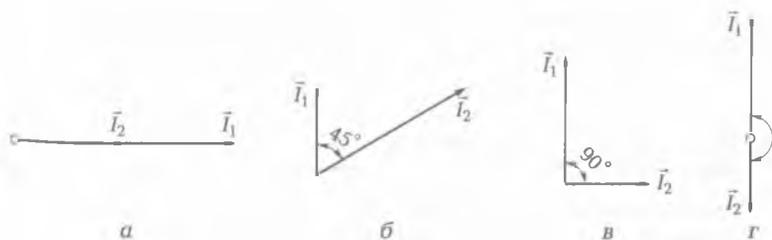


Рис. 4.3. Векторные диаграммы для напряжений с различным сдвигом фаз:

а — на  $0^\circ$ ; б — на  $45^\circ$ ; в — на  $90^\circ$ ; г — на  $180^\circ$

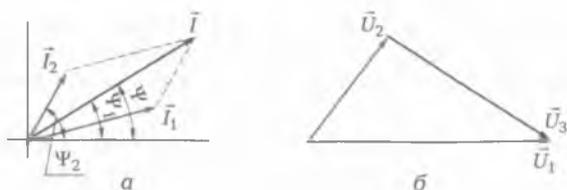


Рис. 4.4. Сложение и вычитание векторов:

а — сложение двух векторов  $\vec{I}_1$  и  $\vec{I}_2$ ; б — вычитание двух векторов  $\vec{U}_1$  и  $\vec{U}_2$

**Сложение векторов.** Суммой двух векторов (рис. 4.4, а)  $\vec{I}_1$  и  $\vec{I}_2$  называется третий вектор  $\vec{I}$ , который служит диагональю параллелограмма, сторонами которого являются слагаемые векторы. Если два вектора  $\vec{U}_1$  и  $\vec{U}_2$  лежат на одной прямой, то сумма таких векторов равна их алгебраической сумме, выраженной вектором  $\vec{U}$ .

**Вычитание векторов.** Чтобы из вектора  $\vec{U}_1$  (уменьшаемое) вычесть вектор  $\vec{U}_2$  (вычитаемое), нужно прибавить к вектору  $\vec{U}_1$  вектор  $\vec{U}_2$  в противоположном направлении.

Если два вектора  $\vec{U}_1$  и  $\vec{U}_2$  имеют общее начало, то их разность геометрически изображается вектором  $\vec{U}_3$ , идущим от конца вычитаемого вектора к концу уменьшаемого вектора (рис. 4.4, б).

**Умножение и деление вектора на число.** Произведением вектора  $\vec{U}_1$  на целое число  $m$  называется новый вектор  $\vec{U}_1 m$ , имеющий то же направление, что и  $\vec{U}_1$ , если  $m > 0$ , и противоположное ему, если  $m < 0$ ; при  $m = 0$  произведение  $\vec{U}_1$  на  $m$  является нулевым вектором.

Чтобы разделить вектор  $\vec{U}_1$  на число (не равное нулю), достаточно умножить этот вектор на обратное число:

$$\frac{\vec{U}_1}{m} = \frac{1}{m} \vec{U}_1.$$

Векторные диаграммы широко используют при анализе электрических цепей переменного тока.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое векторная диаграмма?
2. Для каких значений переменного тока (напряжения) строятся векторные диаграммы?
3. Отличаются ли векторы переменного тока, напряжения, ЭДС от векторов физических величин (силы, скорости, магнитной индукции и т.д.)?

### 4.1.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С РЕЗИСТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ



**Резистивный элемент (активное сопротивление)** — это элемент, в котором происходит превращение электрической энергии в полезную работу или тепловую энергию.

В цепь переменного тока (рис. 4.5, а) включен резистивный элемент  $R$ . В такой цепи под действием переменного напряжения протекает переменный ток. Изменение тока в цепи, согласно закону Ома, зависит только от изменения напряжения, подключенного к ее зажимам. Когда напряжение равно нулю, ток в цепи также равен нулю. По мере увеличения напряжения ток в цепи возрастает, и при максимальном значении напряжения ток становится наибольшим. При уменьшении напряжения ток убывает. Когда напряжение изменяет свое направление, ток также изменяет свое направление и т. д. График мгновенных значений напряжения и тока в схеме с резистивным элементом приведен на рис. 4.5, б.

Из сказанного следует, что в цепи переменного тока с активным сопротивлением по мере изменения по величине и направлению напряжения одновременно пропорционально изменяются величина и направление тока. Это значит, что ток и напряжение совпадают по фазе.

Мгновенное значение тока в цепи

$$i = I_m \sin(\omega t + \Psi_i).$$

Напряжение на зажимах резистивного элемента

$$u_R = Ri = RI_m \sin(\omega t + \Psi_i) = U_{Rm} \sin(\omega t + \Psi_u).$$

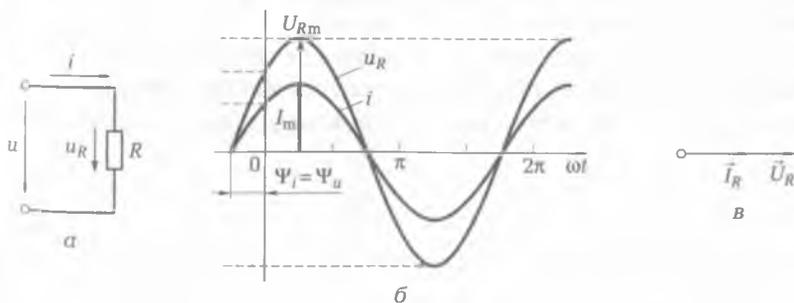


Рис. 4.5. Цепь переменного тока с резистивным элементом:

а — электрическая схема; б — график мгновенных значений напряжения и тока; в — векторная диаграмма

Амплитудное значение напряжения на зажимах резистора

$$U_{Rm} = RI_m.$$

Начальные фазы напряжения и тока

$$\Psi_u = \Psi_i.$$

Сдвиг фаз между напряжением и током

$$\varphi = \Psi_u - \Psi_i = 0.$$

Векторная диаграмма действующих величин тока и напряжения для цепи переменного тока с резистивным элементом приведена на рис. 4.5, в.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется резистивным элементом?
2. В чем выражается действие резистивного элемента при включении его в цепь переменного тока?
3. Чему равен сдвиг фаз между напряжением и током в цепи переменного тока с резистивным элементом?

### 4.1.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ИНДУКТИВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Прохождение электрического тока по индуктивной катушке сопровождается появлением магнитного поля. Рассмотрим электрическую цепь переменного тока (рис. 4.6, а), в которую включена индуктивная катушка, имеющая небольшое число витков проволоки сравнительно большого сечения, активное сопротивление которой можно считать практически равным нулю.

Под действием ЭДС генератора в цепи протекает переменный ток, возбуждающий переменный магнитный поток. Этот поток пересекает витки индуктивной катушки, и в ней возникает ЭДС самоиндукции:

$$e_L = -L \frac{\Delta i}{\Delta t},$$

где  $L$  — индуктивность катушки, Гн;  $\frac{\Delta i}{\Delta t}$  — скорость изменения тока в ней, А/с.

Электродвижущая сила самоиндукции, согласно правилу Ленца, всегда противодействует причине, ее вызывающей, т. е. изменениям переменного тока, вызываемым ЭДС генератора. При расчетах

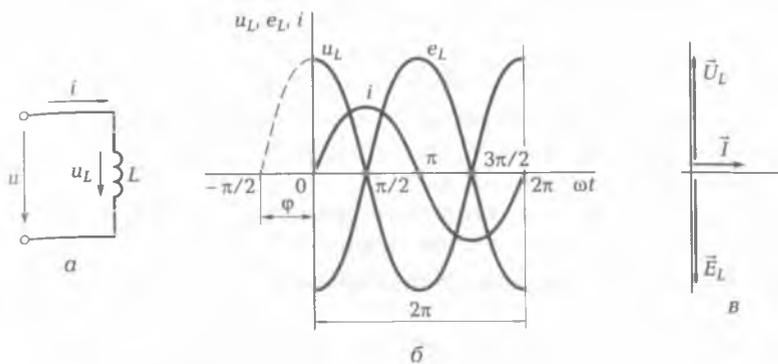


Рис. 4.6. Цепь переменного тока с индуктивной катушкой:

*a* — электрическая схема; *б* — график мгновенных значений напряжения и тока; *в* — векторная диаграмма

это учитывается как индуктивное сопротивление, которое обозначается  $X_L$  и измеряется в омах (Ом). Индуктивное сопротивление индуктивной катушки  $X_L$  зависит от величины ЭДС самоиндукции, скорости изменения тока в индуктивной катушке (частоты переменного тока  $f$ ) и индуктивности индуктивной катушки  $L$ :

$$X_L = 2\pi fL = \omega L,$$

где  $f$  — частота переменного тока, Гц;  $L$  — индуктивность индуктивной катушки, Гн;  $\omega$  — угловая частота переменного тока, рад/с.

**Пример 4.2.** Индуктивная катушка, обладающая индуктивностью  $L = 0,5$  Гн, присоединена к источнику переменного тока, частота которого  $f = 50$  Гц. Определить:

- 1) индуктивное сопротивление катушки при частоте  $f = 50$  Гц;
- 2) индуктивное сопротивление этой катушки переменному току, частота которого  $f = 800$  Гц.

*Решение*

Индуктивное сопротивление катушки переменному току при  $f = 50$  Гц:

$$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,5 = 157 \text{ Ом.}$$

При частоте  $f = 800$  Гц:

$$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 800 \cdot 0,5 = 2512 \text{ Ом.}$$



### Запомните

- Индуктивное сопротивление индуктивной катушки повышается с увеличением частоты переменного тока, протекающего по ней.

По мере уменьшения частоты тока индуктивное сопротивление уменьшается.

- Для постоянного тока, когда ток в индуктивной катушке не изменяется и магнитный поток не пересекает ее витки, ЭДС самоиндукции не возникает и индуктивное сопротивление индуктивной катушки  $X_L$  равно нулю.
- При неизменной индуктивности индуктивной катушки ЭДС самоиндукции зависит от скорости изменения силы тока и всегда направлена навстречу причине, вызвавшей ее.

На графике (рис. 4.6, б) переменный ток  $i$  показан в виде синусоиды. В первую четверть периода сила тока  $i$  возрастает от нулевого до максимального значения. Электродвижущая сила самоиндукции  $e_L$  согласно правилу Ленца препятствует увеличению тока в цепи. На графике показано, что  $e_L$  в это время имеет отрицательное значение. Во вторую четверть периода сила тока в индуктивной катушке убывает до нуля. В это время ЭДС самоиндукции изменяет свое направление и увеличивается, препятствуя убыванию силы тока.

Из графика (см. рис. 4.6, б) видно, что ток в цепи и ЭДС самоиндукции не совпадают по фазе. Ток опережает ЭДС самоиндукции по фазе на четверть периода, или на угол  $\varphi = 90^\circ$ , и в каждый момент времени ЭДС самоиндукции направлена навстречу напряжению генератора  $u$ . В связи с этим напряжение на индуктивной катушке  $u_L$  и ЭДС самоиндукции  $e_L$  также сдвинуты по фазе относительно друга на  $180^\circ$ .

### **!** Запомните

- В цепи переменного тока, содержащей только индуктивность, ток отстает от напряжения, вырабатываемого генератором на угол  $\varphi = 90^\circ$  (на четверть периода) и опережает ЭДС самоиндукции на  $90^\circ$ .
- Напряжение опережает по фазе ток на  $90^\circ$  (см. рис. 4.6, б).

Векторная диаграмма тока и напряжения для цепи переменного тока с индуктивным сопротивлением изображена на рис. 4.6, в.

Для электрической цепи переменного тока  $i = I_m \sin \omega t$  и индуктивностью  $L$  напряжение на зажимах индуктивной катушки определяется формулой

$$u_L = -e_L = \omega L I_m \sin(\omega t + \pi/2) = X_L I_m \sin(\omega t + \pi/2).$$

Индуктивная нагрузка в отличие от активной в среднем не потребляет энергию, которую вырабатывает генератор, а в цепи с индуктивностью происходит «перекачивание» энергии от генератора в индуктивную нагрузку и обратно, т. е. возникают колебания энергии.



### Запомните

Индуктивное сопротивление является реактивным. В цепи, содержащей реактивное сопротивление, происходят колебания энергии от генератора к нагрузке и обратно.



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. От чего зависит индуктивное сопротивление индуктивной катушки?
2. Как с увеличением частоты переменного тока изменяется индуктивное сопротивление индуктивной катушки?
3. Почему в цепи переменного тока, содержащей только индуктивность, ток отстает от напряжения, вырабатываемого генератором, на угол  $\varphi = 90^\circ$ .



### ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Определите индуктивное сопротивление индуктивной катушки с индуктивностью  $L = 10$  мГн, включенной в цепь переменного тока, если частота генератора принимает следующие значения: 50, 100, 150, 200 и 400 Гц. Постройте график зависимости  $X_L = f(\omega)$ . Объясните полученный результат.
2. Напишите выражение для тока  $i$  в электрической цепи (см. рис. 4.6, а), если  $u = 10 \sin \omega t$ ;  $X_L = 5$  Ом.

## 4.1.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ЕМКОСТНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Рассмотрим цепь переменного тока (рис. 4.7, а), в которую включена электрическая емкость (конденсатор). Активным сопротивлением этой цепи пренебрегаем ( $R = 0$ ).

Полярность зажимов генератора переменного тока, включенного в цепь с емкостью, меняется с частотой  $\omega = 2\pi f$ . В первую четверть периода (рис. 4.7, б) конденсатор заряжается и на его пластинах появляются противоположные по знаку электрические заряды (на левой пластине «+», на правой — «-»).

За вторую четверть периода напряжение генератора постепенно убывает и становится равным нулю. В это время конденсатор разря-



Рис. 4.7. Цепь переменного тока с емкостным элементом:

*a* — электрическая схема; *б* — график мгновенных значений напряжения и тока; *в* — векторная диаграмма

жается. При этом разрядный ток, протекающий по проводам, имеет направление, противоположное направлению тока заряда и т. д.

За один период изменения переменного напряжения дважды происходит процесс заряда и разряда конденсатора. При этом в его цепи протекает переменный ток. При заряде и разряде конденсатора ток в цепи и напряжение не совпадают по фазе. Ток опережает по фазе напряжение на четверть периода, т. е. на  $90^\circ$ . Векторная диаграмма для цепи переменного тока с емкостью приведена на рис. 4.7, *в*.

Закон Ома для цепи переменного тока с емкостным элементом можно определить так:

$$I = \omega C U_C, \text{ или } I = \frac{U_C}{X_C},$$

где  $X_C$  — емкостное сопротивление, характеризующее процесс накопления энергии в электрическом поле конденсатора,  $X_C = \frac{1}{\omega C}$ .

**Пример 4.3.** Конденсатор емкостью  $C = 4$  мкФ включен в цепь переменного тока, частота которого 50 Гц. Определить:

- 1) емкостное сопротивление конденсатора на частоте  $f = 50$  Гц;
- 2) емкостное сопротивление этого же конденсатора переменному току, частота которого 500 Гц.

*Решение*

Емкостное сопротивление конденсатора переменному току при частоте  $f = 50$  Гц:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1\,000\,000}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 4} = 796 \text{ Ом.}$$

При частоте  $f = 500$  Гц:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1\,000\,000}{2 \cdot 3,14 \cdot 500 \cdot 4} = 79,6 \text{ Ом.}$$

## **!** Запомните

Сопротивление, оказываемое конденсатором переменному току, зависит от емкости конденсатора и частоты тока. Емкостное сопротивление тем больше, чем меньше емкость конденсатора и ниже частота питающего тока.

Свойство конденсаторов оказывать большое сопротивление токам низкой частоты и легко пропускать токи высокой частоты широко используется в радиоэлектронных схемах. С помощью конденсаторов, например, достигается необходимое для работы радиоэлектронных схем разделение постоянных токов и токов низкой частоты от токов высокой частоты.

Следует подчеркнуть, что имеется существенное различие между емкостным и активным сопротивлениями. Как известно, активная нагрузка безвозвратно потребляет энергию генератора переменного тока.

Если же к источнику переменного тока присоединена емкость, то, как было рассмотрено ранее, энергия генератора расходуется при заряде конденсатора на создание электрического поля между пластинами и возвращается обратно генератору при разряде конденсатора.

Емкостная нагрузка не потребляет энергию генератора, а в цепи с емкостью происходит «перекачивание» энергии из генератора в конденсатор и обратно. По этой причине емкостное сопротивление, как и индуктивное, называется **реактивным**.

## **?** КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. От чего зависит емкостное сопротивление конденсатора?
2. Как с увеличением частоты переменного тока изменяется емкостное сопротивление конденсатора?
3. Почему емкостное сопротивление конденсатора называется реактивным?

## **П** ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Напишите выражение для тока  $i$  в электрической цепи (см. рис. 4.7, а), если напряжение  $u_C = 60 \sin(\omega t - 90^\circ)$ ,  $X_C = 20 \text{ Ом}$ .
2. Определите емкостное сопротивление конденсатора емкостью  $C = 100 \text{ мкФ}$ , включенного в цепь переменного тока, если частота генератора принимает следующие значения: 50, 100, 150, 200 и 400 Гц. Постройте график зависимости  $X_C = f(\omega)$ . Объясните полученный результат.

#### 4.1.6. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С АКТИВНЫМ, ИНДУКТИВНЫМ И ЕМКОСТНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ

При расчетах цепей переменного тока, так же как и цепей постоянного тока, используют законы Ома и Кирхгофа. Отличие в применении этих законов заключается в том, что в цепях переменного тока необходимо учитывать углы сдвига фаз между токами и напряжениями.

Цепь переменного тока, в которую включены последовательно активное сопротивление  $R$ , индуктивность  $L$ , обладающая индуктивным сопротивлением  $X_L$ , и емкость  $C$ , имеющая емкостное сопротивление  $X_C$ , изображена на рис. 4.8, а.

Под действием переменного напряжения  $u$  в этой цепи протекает переменный ток  $i$ . Согласно закону Ома определим падения напряжения на каждом элементе цепи:

$$U_R = IR; \quad U_L = IX_L; \quad U_C = IX_C.$$

Эти падения напряжения имеют соответствующие углы сдвига фаз по отношению к общему току цепи  $\vec{I}$ .

Построим векторную диаграмму тока и напряжений для рассматриваемой цепи (рис. 4.8, б). Так как сопротивления соединены последовательно, то в них протекает одинаковый ток. Отложим по горизонтали в выбранном масштабе вектор тока  $\vec{I}$ . В цепи с активным сопротивлением ток и напряжение совпадают по фазе, поэтому вектор напряжения  $\vec{U}_R$  откладываем по вектору тока  $\vec{I}$ . Напряжение на индуктивности опережает ток на угол  $\varphi = 90^\circ$ . Поэтому вектор  $\vec{U}_L$  откладываем вверх под углом  $90^\circ$  к вектору тока  $\vec{I}$ . В цепи с емкостью, наоборот, напряжение отстает от тока на угол  $\varphi = 90^\circ$ , поэтому вектор  $\vec{U}_C$  откладываем на диаграмме вниз под углом  $90^\circ$  к вектору тока  $\vec{I}$ .

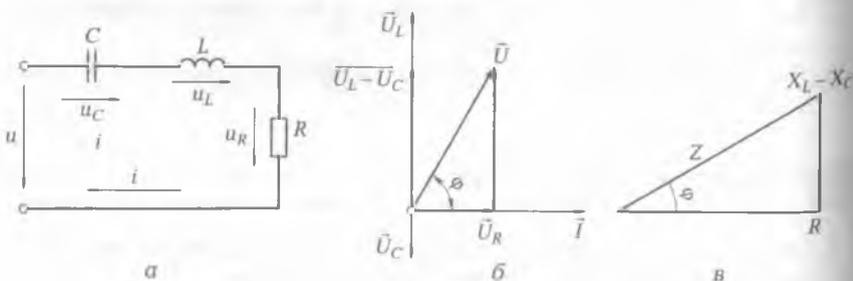


Рис. 4.8. Цепь переменного тока с последовательно включенными сопротивлением, индуктивностью и емкостью:

а — электрическая схема; б — векторная диаграмма; в — треугольник сопротивлений

Для определения общего напряжения, приложенного к зажимам цепи, сложим векторы  $\vec{U}_L$  и  $\vec{U}_C$ . Для этого вычтем из большего вектора  $\vec{U}_L$  вектор  $\vec{U}_C$  и получим вектор  $(\vec{U}_L - \vec{U}_C)$ , выражающий векторную сумму этих двух напряжений. Теперь сложим векторы  $(\vec{U}_L - \vec{U}_C)$  и  $\vec{U}_R$ .

Суммой этих векторов будет диагональ параллелограмма — вектор  $\vec{U}$ , являющийся общим напряжением на зажимах цепи:

$$U = \sqrt{U_R + (U_L - U_C)^2} = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

Полное сопротивление цепи переменного тока, содержащей активное, индуктивное и емкостное сопротивления,

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2};$$

$$Z = \frac{U}{I}.$$

Полная проводимость цепи:

$$Y = \frac{1}{Z}.$$

Угол сдвига фаз между током и напряжением цепи определяется тригонометрическими функциями:

$$\cos \varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{R}{Z};$$

$$\sin \varphi = \frac{U_L - U_C}{U} = \frac{X_L - X_C}{Z}.$$

Если  $X_L > X_C$ , то вектор напряжения  $\vec{U}$  опережает вектор тока  $\vec{I}$ , а если  $X_L < X_C$ , то  $\vec{U}$  отстает от тока  $\vec{I}$ .

Треугольник сопротивлений изображен на рис. 4.8, в.

**Пример 4.4.** В электрическую цепь, приведенную на рисунке, с напряжением  $U = 220$  В последовательно включены: резистор с активным сопротивлением  $R_1 = 5$  Ом, индуктивная катушка  $L$  с активным сопротивлением  $R_2 = 3$  Ом и индуктивным сопротивлением  $X_L = 4$  Ом, конденсатор  $C$  с емкостным сопротивлением  $X_C = 10$  Ом. Определить ток в цепи и напряжение на отдельных элементах цепи. Нарисовать векторную диаграмму.

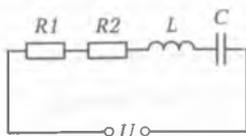
**Решение**

Определяем общее сопротивление:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(5+3)^2 + (10-4)^2} = 10 \text{ Ом.}$$

Ток в цепи

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А.}$$



Напряжение на отдельных элементах цепи:

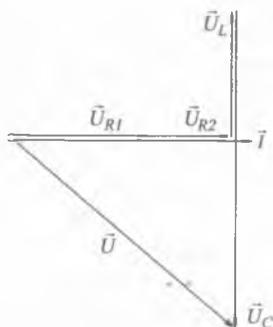
$$U_{R_1} = IR_1 = 22 \cdot 5 = 110 \text{ В};$$

$$U_{R_2} = IR_2 = 22 \cdot 3 = 66 \text{ В};$$

$$U_L = IX_L = 22 \cdot 4 = 88 \text{ В};$$

$$U_C = IX_C = 22 \cdot 10 = 220 \text{ В}.$$

Векторная диаграмма приведена на рисунке ниже.



Рассмотрим электрическую цепь, состоящую из двух приемников, подключенных параллельно к зажимам источника синусоидального напряжения  $u = U_m \sin \omega t$  (рис. 4.9, а). В первом приемнике включены последовательно элементы  $R_1$  и  $L$ , во втором соответственно  $R_2$  и  $C$ . Оба приемника находятся под действием одного общего напряжения  $u$ . Запишем выражения для мгновенных значений токов для первой и второй ветви:

$$i_1 = I_{1m} \sin(\omega t - \varphi_1);$$

$$i_2 = I_{2m} \sin(\omega t + \varphi_2).$$

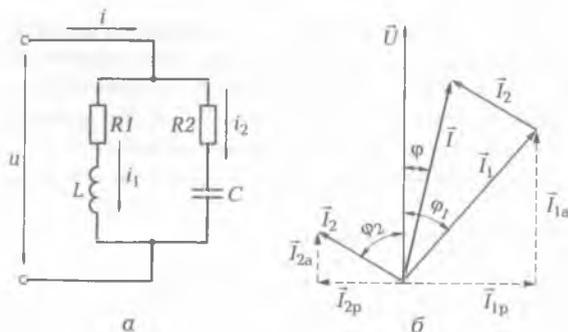


Рис. 4.9. Цепь переменного тока с параллельно соединенными элементами  
а — электрическая схема; б — векторная диаграмма

Так как в первую ветвь включена индуктивная катушка, а во вторую — конденсатор, то электрические цепи соответственно носят индуктивный и емкостной характер.

Действующее значение тока  $I$  и косинус угла  $\varphi$  определяем из следующих выражений:

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}, \quad \cos\varphi_1 = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + X_C^2}} \quad (\text{для первой ветви});$$

$$I_2 = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}, \quad \cos\varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_L^2}} \quad (\text{для второй ветви}).$$

Значение тока  $I$  в неразветвленной части цепи определяют как геометрическую сумму токов в ветвях, т. е.  $I = I_1 + I_2$ .

Векторная диаграмма приведена на рис. 4.9, б. Токи, протекающие через ветви, состоят из активной  $I_a$  и реактивной  $I_p$  составляющих и соответственно имеют индуктивный и емкостной характер.

Ветвь с активной составляющей характеризуется активной проводимостью

$$g_1 = \frac{R_1}{Z_1^2}.$$

Ветвь с реактивной составляющей характеризуется реактивной проводимостью  $b_L$ . Для первой ветви реактивная проводимость

$$b_L = \frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2}.$$

Реактивная проводимость  $b_L$  не является величиной, обратной реактивному сопротивлению, так как при ее определении учитывается и активное сопротивление ветви. Полная проводимость ветви

$$Y_1 = \sqrt{g_1^2 + b_L^2}.$$

## ? КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие законы используют при расчете цепей переменного тока?
2. В чем состоит принципиальное отличие расчета цепей переменного тока от расчета цепей постоянного тока?

## П ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Рассчитайте напряжение, которое необходимо приложить к зажимам индуктивной катушки, чтобы в ней протекал ток 2 А, если активное со-

противление катушки  $R = 6 \text{ Ом}$ , а индуктивное сопротивление  $X_L = 8 \text{ Ом}$ . Постройте векторную диаграмму напряжений.

- Падение напряжения на активном сопротивлении индуктивной катушки  $U_R = 36 \text{ В}$ . Общее напряжение на ее зажимах  $U = 60 \text{ В}$ . Определите угол сдвига фаз между током и напряжением в цепи.
- Вычислите полное сопротивление электрической цепи переменного тока, состоящей из активного сопротивления  $R = 10 \text{ Ом}$ , конденсатора с емкостным сопротивлением  $X_C = 8 \text{ Ом}$  и индуктивностью с индуктивным сопротивлением  $X_L = 6 \text{ Ом}$ .
- Определите общее сопротивление электрической цепи переменного тока, состоящей из индуктивной катушки с индуктивностью  $L = 10 \text{ мГн}$  и конденсатора емкостью  $C = 5 \text{ мкФ}$ . Частота переменного тока в электрической цепи  $f = 50 \text{ Гц}$ .

#### 4.1.7. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

В цепи переменного тока с активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями, соединенными последовательно (рис. 4.10, а), может возникнуть резонанс напряжений.

Резонанс напряжений наступает в том случае, если индуктивное сопротивление  $X_L$  и емкостное сопротивление  $X_C$  равны между собой, т. е.

$$X_L = X_C.$$

Так как эти сопротивления зависят от частоты, резонанс наступает при определенной резонансной частоте  $\omega_0$ :

$$\frac{1}{\omega_0 C} = \omega_0 L; \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

При заданной частоте  $\omega$  резонанс напряжений может быть достигнут изменением  $L$  и  $C$ .

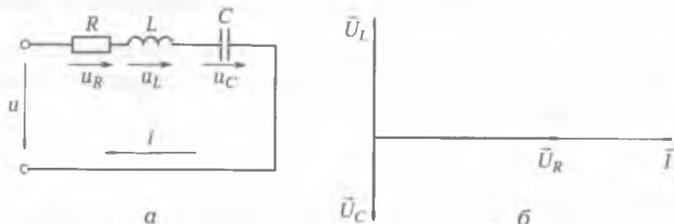


Рис. 4.10. Цепь переменного тока при резонансе напряжения:  
а — электрическая схема; б — векторная диаграмма

Когда цепь не настроена в резонанс, ее полное сопротивление

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

При резонансе напряжений в рассматриваемой цепи, когда  $X_L = X_C$ , ее полное сопротивление

$$Z = \sqrt{R^2} = R.$$

### **!** Запомните

- Полное сопротивление цепи при резонансе напряжений равно активному сопротивлению  $R$ .
- Угол сдвига фаз  $\varphi$  между током и напряжением при резонансе равен нулю. Это значит, что ток и напряжение совпадают по фазе (как в цепи с активным сопротивлением).

Уменьшение полного сопротивления цепи приводит к тому, что сила тока в ней возрастает. Напряжение генератора переменного тока, включенного в цепь, расходуется на активном сопротивлении:

$$U_R = IR.$$

Напряжение на индуктивности и емкости определяется согласно закону Ома. В связи с тем что в последовательно соединенных сопротивлениях протекает одинаковый ток и при резонансе индуктивное сопротивление  $X_L = X_C$ , напряжения на индуктивности и емкости тоже равны:

$$U_L = U_C = IX_L = IX_C = I\omega L = \frac{I}{\omega C}.$$

Векторная диаграмма для рассматриваемой цепи при резонансе напряжения приведена на рис. 4.10, б. На векторной диаграмме видно, что напряжения на индуктивности и емкости равны, сдвинуты по фазе друг относительно друга на  $180^\circ$  и взаимно компенсируются.

Если одновременно увеличить оба реактивных сопротивления  $X_L$  и  $X_C$ , не нарушая при этом условия резонанса  $X_L = X_C$ , то соответственно возрастут оба частичных напряжения  $U_L$  и  $U_C$ , а сила тока в цепи при этом не изменится. Таким образом, можно получить  $U_L$  и  $U_C$  во много раз большие, чем напряжение  $U$  на зажимах цепи, поэтому резонанс напряжений — опасное явление для энергетических установок.

В электроустановках большой мощности резонанс напряжений, который может наступить внезапно, например при изменении емкостного сопротивления, может привести к опасным перенапряже-

ниям и рассматривается как **аварийный**. В технике связи и автоматике явление резонанса напряжений широко используют для настройки приемных и передающих устройств на определенную частоту.

**Пример 4.5.** В цепь переменного тока включены последовательно активное сопротивление  $R = 3$  Ом, индуктивность  $L = 0,005$  Гн и емкость  $C = 63,5$  мкФ. Генератор, включенный в цепь, вырабатывает переменное напряжение  $U = 2,5$  В с резонансной частотой  $f = 285$  Гц. Определить индуктивное и емкостное сопротивления, полное сопротивление цепи, ток, протекающий в цепи, напряжения на емкости и индуктивности.

*Решение*

Индуктивное сопротивление

$$X_L = \omega L = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 285 \cdot 0,005 = 8,9 \text{ Ом.}$$

Емкостное сопротивление

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1\,000\,000}{2 \cdot 3,14 \cdot 285 \cdot 63,5} = 8,9 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление равно емкостному, следовательно, в цепи наступает резонанс напряжения.

Полное сопротивление цепи при резонансе напряжения

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{3^2 + (8,9 - 8,9)^2} = 3 \text{ Ом.}$$

Сила тока в цепи

$$I = \frac{U}{R} = \frac{2,5}{3} = 0,83 \text{ А.}$$

Напряжение на индуктивности

$$U_L = IX_L = 0,83 \cdot 8,9 = 7,4 \text{ В.}$$

Напряжение на емкости

$$U_C = IX_C = 0,83 \cdot 8,9 = 7,4 \text{ В.}$$

Как видно из представленного примера, в режиме резонанса напряжения на индуктивности и емкости равны и превышают напряжение генератора.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется резонансом напряжений?
2. Чему равно полное сопротивление цепи при резонансе напряжений?
3. Чему равен угол сдвига фаз  $\varphi$  между током и напряжением при резонансе напряжений?
4. Какую опасность представляет резонанс напряжений в технике?



## ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Электрическая цепь (см. рис. 4.10, а) имеет следующие параметры:  $U = 100$  В,  $R = 10$  Ом,  $X_L = 20$  Ом. Определите напряжение на конденсаторе при резонансе.
2. Электрическая цепь (см. рис. 4.9, а) имеет следующие параметры:  $U = 200$  В,  $R = 100$  Ом,  $X_L = X_C = 20$  Ом. Найдите ток в цепи.
3. При частоте 50 Гц сопротивление  $X_L$  в четыре раза меньше  $X_C$  (см. схему рис. 4.10, а). Установите, как надо изменить частоту напряжения питания, чтобы в цепи возник резонанс.

### 4.1.8. РЕЗОНАНС ТОКОВ

В цепи переменного тока, в которой индуктивность  $L$ , емкость  $C$  и сопротивление  $R$  соединены параллельно (рис. 4.11, а), может возникнуть резонанс токов при условии равенства реактивных сопротивлений:

$$X_L = X_C.$$

Ток при резонансе достигает минимального значения  $I = U/R$ , а  $\cos\varphi = 1$ , т. е. достигает своего максимального значения.

Значение резонансной частоты определяется формулой

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Из формулы следует, что, изменяя величину емкости или индуктивности контура, можно изменять (регулировать) частоту свободных колебаний, т. е. настраивать контур на определенную частоту.

Векторная диаграмма изображена на рис. 4.11, б в режиме резонанса токов.

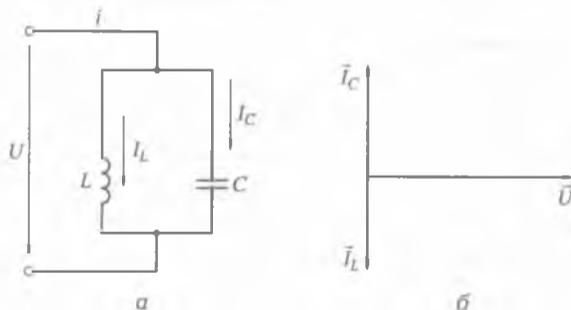


Рис. 4.11. Цепь переменного тока при резонансе тока:

а — электрическая схема; б — векторная диаграмма

Свободные электрические колебания, возникающие в колебательном контуре, всегда затухающие. Затухание колебаний в контуре объясняется тем, что при прохождении электрического тока в контуре энергия тратится на нагревание провода, из которого изготовлены индуктивная катушка и соединительные провода.

Потеря энергии в контуре вызывает постепенное уменьшение амплитуды свободных колебаний и их полное прекращение. Скорость затухания колебаний в контуре связана с потерей энергии в нем и зависит от сопротивления контура.

### **!** Запомните

- Токи в ветвях, содержащих  $L$  и  $C$ , при резонансе тока могут быть больше общего тока цепи.
- Индуктивный и емкостной токи противоположны по фазе, равны по значению и по отношению к источнику энергии взаимно компенсируются, т. е. идет обмен энергией между индуктивной катушкой и конденсатором.
- Реактивная мощность цепи при резонансе токов равна нулю, поскольку равны и противоположно направлены токи  $I_L$  и  $I_C$ . Иными словами, реактивная мощность, потребляемая в индуктивной катушке, равна реактивной мощности, генерируемой в конденсаторе.

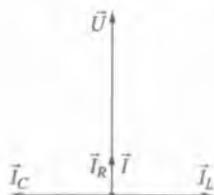
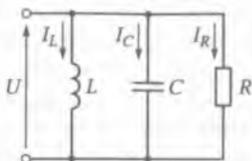
В результате резонанса токов общий ток в цепи может быть относительно мал, а в ветвях индуктивности и емкости, где происходят электрические колебания, переменный ток значительно больше общего.

**Пример 4.6.** Разветвленная цепь, приведенная на рисунке слева, имеет следующие параметры:  $X_L = X_C = 10$  Ом,  $R = 40$  Ом,  $U = 120$  В. Определите токи в ветвях и общий ток цепи. Построить векторную диаграмму.

*Решение*

Определим токи в ветвях:

$$I_L = \frac{U}{X_L} = \frac{120}{10} = 12 \text{ А}; \quad I_C = \frac{U}{X_C} = \frac{120}{10} = 12 \text{ А}; \quad I_R = \frac{U}{X_R} = \frac{120}{40} = 3 \text{ А}.$$



Рассчитаем общий ток цепи:

$$I = I_R = 3 \text{ А.}$$

Векторная диаграмма изображена на рисунке справа.

Общий ток цепи при резонансе токов в четыре раза меньше тока в ветвях, содержащих реактивные элементы.

## **?** КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. При каких условиях возникает резонанс токов?
2. От чего зависит скорость затухания колебаний в контуре?
3. Чему равна реактивная мощность цепи при резонансе токов?

### 4.1.9. МОЩНОСТЬ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Полная мощность генератора переменного тока, В-А, определяется произведением тока на напряжение:

$$S = IU,$$

где  $I$  — действующая сила тока, на которую рассчитана обмотка генератора, А;  $U$  — действующее значение напряжения генератора, В.

Размеры генератора переменного тока зависят от полной мощности, на которую он рассчитывается. Это связано с тем, что поперечное сечение проводов обмотки определяется силой тока, а толщина изоляции и число витков обмотки — напряжением, которое будет вырабатывать генератор.

Полная мощность генератора переменного тока, включенного в цепь с активным сопротивлением  $R$  и реактивными сопротивлениями ( $X_L$  и  $X_C$ ), состоит из мощности, расходуемой в активном сопротивлении  $R$ , и реактивной части мощности.

#### **!** Запомните

- Мощность, расходуемая в активном сопротивлении, преобразуется в полезную работу или теплоту, рассеиваемую в пространство.
- Реактивная часть мощности обусловлена колебаниями энергии при создании и исчезновении магнитных и электрических полей. Энергия то запасается в полях реактивных сопротивлений, то возвращается генератору, включенному в цепь.

Реактивные токи, протекающие между генератором и реактивными приемниками, обладающими индуктивным и емкостным со-

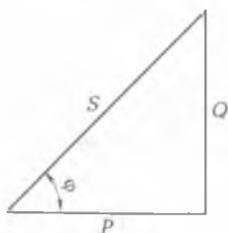


Рис. 4.12. Треугольник мощностей цепи переменного тока, содержащий  $R$ ,  $L$  и  $C$

противлениями, бесполезно загружают линию и генератор и вызывают дополнительные потери энергии.

Связь между полной, активной и реактивной мощностями можно определить из треугольника мощностей (рис. 4.12).

Активная мощность, Вт,

$$P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi.$$

Реактивная мощность, вар,

$$Q = S \sin \varphi = UI \sin \varphi.$$

Единица реактивной мощности — вольт-ампер реактивный (вар)  
Полная мощность, В · А,

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Чтобы судить о том, какая часть полной мощности расходуется как активная (полезная) мощность и какая часть является реактивной (бесполезной) мощностью, следует разделить активную мощность ( $P$ ) на полную ( $S$ ). Из треугольника мощностей видно, что это отношение характеризуется косинусом угла сдвига фаз между током и напряжением в данной цепи:

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi.$$

Таким образом,  $\cos \varphi$  является **коэффициентом мощности переменного тока**.

В цепи переменного тока с активным сопротивлением ток и напряжение совпадают по фазе и угол сдвига фаз  $\varphi = 0$ , соответственно  $\cos \varphi = 1$ , активная мощность для такой цепи будет равна полной мощности. В данном случае вся мощность генератора используется для полезной работы.

Угол сдвига фаз  $\varphi$  между током и напряжением зависит от соотношения между активным и реактивным сопротивлениями, включенными в электрическую цепь.

Увеличение активного сопротивления приводит к уменьшению угла сдвига фаз, а следовательно, к возрастанию косинуса этого угла и увеличению коэффициента мощности. Индуктивная нагрузка, подключенная в цепь, наоборот, увеличивает угол сдвига фаз и тем самым понижает коэффициент мощности.

Причиной низкого коэффициента мощности может быть работа электродвигателей станков или машин вхолостую; недогрузка стан-

ка, связанная с тем, что на станке большой мощности обрабатываются мелкие детали; неправильный выбор мощности двигателя, устанавливаемого на станке; низкое качество ремонта двигателя; плохая смазка и т. д.

При нормальной нагрузке двигателя его коэффициент мощности составляет 0,83—0,85. При холостом ходе двигателя его коэффициент мощности понижается и составляет 0,1—0,3.

Для повышения коэффициента мощности параллельно к индуктивной нагрузке подключают конденсаторы. Емкостное сопротивление этих конденсаторов подбирают с таким расчетом, чтобы оно было примерно равно индуктивному сопротивлению. При этом емкостный ток будет также примерно равен индуктивному току. В этом случае угол сдвига фаз между током и напряжением уменьшается, а коэффициент мощности возрастает до 0,85—0,9.

**Пример 4.7.** Полная мощность электротехнической установки  $S = 800$  В·А. Ваттметр, измеряющий активную часть мощности, показывает, что она равна 720 Вт. Определить коэффициент мощности  $\cos \varphi$ .

*Решение*

Коэффициент мощности  $\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{720}{800} = 0,9$ . Это означает, что 90 % полной мощности расходуется в виде активной мощности на полезную работу, а 10 % обусловлены наличием реактивной бесполезной мощности.

**Пример 4.8.** Произвести расчет электрической цепи переменного тока, в которую включена индуктивная катушка, обладающая индуктивным сопротивлением  $X_L = 30$  Ом и активным сопротивлением  $R = 40$  Ом. Напряжение на зажимах индуктивной катушки 120 В. Определить:

- 1) полное сопротивление цепи;
- 2) силу тока в индуктивной катушке;
- 3) коэффициент мощности;
- 4) угол сдвига фаз между током и напряжением;
- 5) полную, активную и реактивную мощности.

*Решение*

1. Полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{40^2 + 30^2} = 50 \text{ Ом.}$$

2. Сила тока в цепи

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{120}{50} = 2,4 \text{ А.}$$

3. Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{40}{50} = 0,8.$$

Если  $\cos \varphi = 0,8$ , то угол сдвига фаз  $\varphi = 36^\circ$ .

#### 4. Полная мощность

$$S = UI = 2,4 \cdot 120 = 288 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

#### 5. Активная мощность

$$P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi = 2,4 \cdot 120 \cdot 0,8 = 230,4 \text{ Вт}.$$

#### Реактивная мощность

$$Q = S \sin \varphi = UI \sin \varphi = 2,4 \cdot 120 \cdot 0,6 = 172,8 \text{ вар}.$$



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. От каких величин зависит полная мощность генератора переменного тока?
2. Что называется коэффициентом мощности?
3. Что является причиной низкого коэффициента мощности?
4. Какие меры необходимо принять для повышения коэффициента мощности?



### ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

---

1. На распределительном щите установлены три прибора: амперметр, вольтметр и ваттметр. Показания амперметра — 40 А, вольтметра — 110 В, ваттметра — 4 кВт. Определите  $Z$ ,  $R$ ,  $X_L$ ,  $S$ ,  $Q$ ,  $P$ ,  $\cos \varphi$ ,  $U_L$ ,  $U_R$ .
2. Рассчитайте ток, потребляемый однофазным двигателем мощностью 5 кВт, если он включен в сеть 120 В, а его коэффициент мощности — 0,8.
3. На электростанции установлен генератор однофазного переменного тока мощностью 200 кВт · А, напряжением 100 В. Найдите активную мощность, отдаваемую генератором в сеть, при коэффициентах мощности: 1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2. Объясните полученные результаты.
4. На паспорте двигателя написано:  $U = 120 \text{ В}$ ,  $I = 5 \text{ А}$ ,  $\cos \varphi = 0,8$ . Определите активное, индуктивное и полное сопротивления обмотки двигателя.
5. Однофазный электродвигатель, включенный в сеть 120 В, потребляет ток 2 А. Коэффициент мощности двигателя равен 0,85. Вычислите активную и полную мощности, забираемые двигателем из сети.



### ТЕМЫ ДОКЛАДОВ И РЕФЕРАТОВ

---

1. Применение переменного тока в твоей профессии.
2. Получение переменной ЭДС.
3. Применение явления резонанса в технике.
4. Методы повышения коэффициента мощности электротехнических устройств.

## 4.2. ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

### 4.2.1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В промышленности наибольшее распространение получили трехфазные электрические системы как наиболее простые и экономичные для передачи электрической энергии на дальние расстояния с наименьшими потерями.

Заслуга открытия трехфазного тока и его первого практического применения принадлежит талантливому русскому инженеру-электрику М. О. Доливо-Добровольскому (1862—1913). Он создал первые генераторы и двигатели трехфазного тока, получившие широкое распространение. Современная электрификация также многим обязана этому замечательному русскому изобретателю.

→ **Трехфазная цепь** представляет собой совокупность трех электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, синхронизированные таким образом, что их начальные фазы отличаются на угол  $\Psi = 2\pi/3 = 120^\circ$ .

Каждую отдельную цепь трехфазной системы называют **фазой**. Временная диаграмма таких ЭДС  $e_A$ ,  $e_B$ ,  $e_C$  приведена на рис. 4.13, а, а их векторная диаграмма — на рис. 4.15, б.

В симметричной трехфазной системе сумма мгновенных значений ЭДС в любой момент времени равна нулю:

$$e_A + e_B + e_C = 0.$$

То же и для действующих значений векторов ЭДС:

$$\vec{E}_A + \vec{E}_B + \vec{E}_C = 0.$$

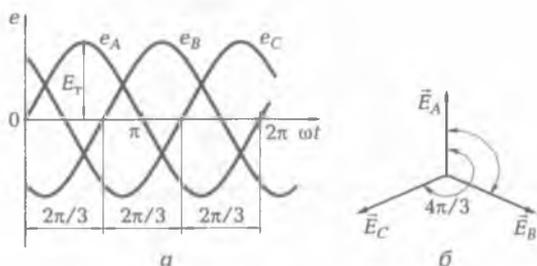


Рис. 4.13. Трехфазная симметричная система:  
а — графики мгновенных значений ЭДС; б — векторная диаграмма

Применяются следующие обозначения фазы:  $A$  или  $a$  — начало,  $X$  или  $x$  — конец фазы (прописные буквы относятся к источнику, а строчные — к нагрузке). Всю фазу называют фазой  $A$ , следующие — фазы  $B$  и  $C$ .

### **!** Запомните

Трехфазная система ЭДС называется **симметричной**, если ЭДС синусоидальны, их частота и амплитуда одинаковы и ЭДС каждой фазы смещены относительно друг друга на угол  $2\pi/3$ .

### **?** КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляет собой трехфазная цепь?
2. Какая трехфазная система переменного тока называется симметричной?
3. Как называется каждая из цепей трехфазной системы?

#### 4.2.2. СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ГЕНЕРАТОРА И ПРИЕМНИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Электроприемники (нагрузка) и обмотки источников электрической энергии (генераторы) в трехфазных системах могут быть соединены по схеме «звезда» —  $Y$  или «треугольник» —  $\Delta$ .

**Схемы соединения обмоток трехфазного генератора.** При соединении фаз генератора по схеме «звезда» (рис. 4.14, а) концы фаз объединяют в одну точку  $N$ , которая называется **нулевой**, или **нейтральной**. Нагрузку можно подключать к зажимам:  $N-A$ ;  $N-B$ ;  $N-C$  или  $A-B$ ;  $B-C$ ;  $C-A$ .

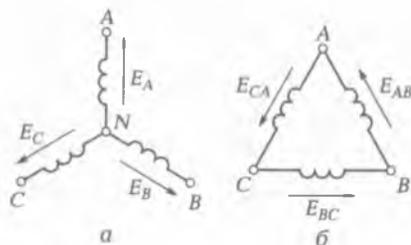


Рис. 4.14. Схемы соединения фаз генератора:  
а — по схеме «звезда»; б — по схеме «треугольник»

Электродвижущие силы  $E_A$ ,  $E_B$ ,  $E_C$  называются **фазными**, а  $E_{AB}$ ,  $E_{BC}$  и  $E_{CA}$  — **линейными**.

В симметричной трехфазной системе соотношение между фазными и линейными ЭДС имеют вид

$$E_{\lambda} = \sqrt{3}E_{\phi}.$$

При соединении фаз источника по схеме «треугольник» нагрузку подключают к его вершинам (рис. 4.14, б). При этом линейные и фазные ЭДС и напряжения оказываются равными:

$$E_{\phi} = E_{\lambda}; \quad U_{\phi} = U_{\lambda}.$$

Такое соединение возможно лишь при симметричном источнике. В этом случае фазы образуют замкнутый контур, ток в котором отсутствует. Практически невозможно выполнить все обмотки одинаковыми, т. е. система ЭДС всегда несимметрична. В ней появляется уравнительный ток, что нежелательно, поэтому обмотки генератора (за редким исключением) соединяют «звездой».

Приемники электрической энергии могут быть соединены в «треугольник» и «звезду». Обычно задается значение линейного напряжения источника. Стандартом предусмотрена шкала линейных напряжений: 127, 220, 380, 500, 660 В и т. д. Каждое из них в  $\sqrt{3}$  раза больше предыдущего.

**Соединение фаз нагрузки в «звезду» и «треугольник».** Если объединить концы фаз генератора и концы фаз нагрузки в общую точку (рис. 4.15), то получим трехфазную **четырёхпроводную** систему (так включают осветительные и бытовые приборы, однофазные двигатели и т. д.) или **трехпроводную** (трехфазные двигатели, индукционные печи и др.).

Провода, соединяющие генератор с нагрузкой, называются **линейными**. Провод, соединяющий нейтральные точки источника и нагрузки, называется **нейтральным**.

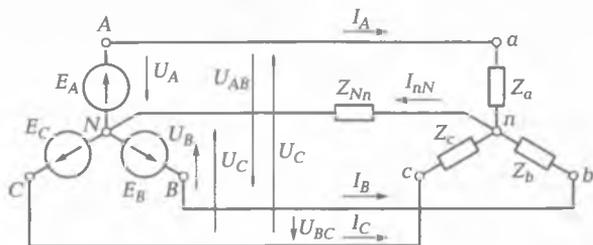


Рис. 4.15. Трехфазная четырехпроводная система

Для четырехпроводной системы (см. рис. 4.15), где приемники включены между нейтральным проводом и каждым из линейных проводов, можно записать:

$$I_{\Lambda} = I_{\Phi}$$

$$U_{\Lambda} = \sqrt{3}U_{\Phi}$$

Нагрузка в трехфазной цепи может быть следующей.

1. **Неоднородной и неравномерной**, если сопротивления фаз нагрузки различны по характеру (аргументу) и значению (модулю):

$$Z_a \neq Z_b \neq Z_c; \quad \varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$$

2. **Равномерной**, если сопротивления фаз равны по модулю, но отличаются по характеру:

$$Z_a = Z_b = Z_c; \quad \varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$$

3. **Однородной**, если сопротивления фаз нагрузки одинаковы по характеру (аргументу), но отличаются по значению (модулю):

$$Z_a \neq Z_b \neq Z_c; \quad \varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$$

4. **Симметричной**, если сопротивления фаз одинаковы по значению и модулю:

$$Z_a = Z_b = Z_c; \quad \varphi_a = \varphi_b = \varphi_c$$

При соединении фаз нагрузки в «треугольник» (рис. 4.16) объединяют зажимы  $a$ ,  $b$  и  $c$ . Здесь  $I_A, I_B, I_C$  — линейные,  $I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}$  — фазные токи нагрузки;  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  — напряжения фаз нагрузки.

При симметричной нагрузке векторы линейных напряжений и токов образуют равносторонний треугольник и связь между линейными и фазными токами определяется соотношением

$$I_{\Lambda} = \sqrt{3}I_{\Phi}$$

На практике в трехфазную цепь наиболее часто включают несколько приемников, которые могут быть соединены как в «звезду», так и в «треугольник».

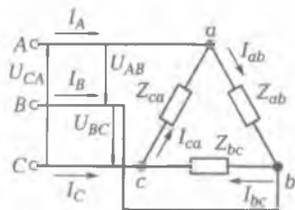


Рис. 4.16. Соединение фаз нагрузки в «треугольник»

## Запомните

- Приемники и обмотки источников электрической энергии в трехфазных системах могут быть включены «звездой» и «треугольником».
- Каждую отдельную цепь трехфазной системы называют фазой.
- Расчет симметричной трехфазной системы при равномерной нагрузке сводится к расчету одной фазы независимо от наличия нейтрального провода.
- Соединение фаз «треугольником» выгодно отличается от соединения фаз «звездой» тем, что изменение нагрузки одной фазы не отражается на работе двух других фаз при условии, что сопротивление линейных проводов практически мало.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как соединяются приемники и обмотки источников электрической энергии в трехфазных системах?
2. Как классифицируется нагрузка в трехфазной цепи?
3. Что называется фазой цепи трехфазного тока?
4. Каково соотношение между фазным и линейным напряжениями при соединении «звездой»?
5. Каково соотношение между токами в линейном проводе и нагрузке при соединении фаз «треугольником»?

### 4.2.3. МОЩНОСТЬ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Активная мощность трехфазного источника равна сумме активных мощностей отдельных фаз:

$$P_{\text{ист}} = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C.$$

Реактивная мощность трехфазного источника равна сумме реактивных мощностей отдельных фаз:

$$Q_{\text{ист}} = Q_A + Q_B + Q_C = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C.$$

Активная мощность приемников трехфазной цепи равна также сумме активных мощностей отдельных фаз:

$$P_{\text{пр}} = P_a + P_b + P_c.$$

Реактивная мощность приемников трехфазной цепи соответственно равна алгебраической сумме реактивных мощностей отдельных фаз:

$$Q_{\text{пр}} = Q_a + Q_b + Q_c$$

Полная мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

При симметричном трехфазном приемнике (нагрузке), соединенном «звездой» или «треугольником»:

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3}U_{\lambda}I_{\lambda} \cos \varphi;$$

$$Q = 3Q_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} \sin \varphi = \sqrt{3}U_{\lambda}I_{\lambda} \sin \varphi;$$

$$S = 3S_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} = \sqrt{3}U_{\lambda}I_{\lambda}.$$

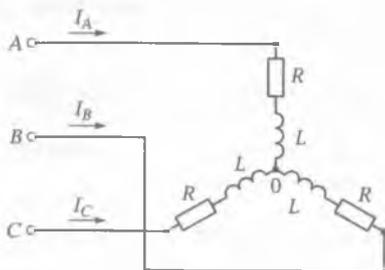
### ! Запомните

При несимметричной системе напряжений или неравномерной нагрузке фаз мощности определяются отдельно для каждой фазы.

**Пример 4.9.** Три одинаковые индуктивные катушки включены в сеть трехфазного тока с линейным напряжением  $U_{\lambda} = 220$  В. Активное сопротивление каждой катушки  $R = 7$  Ом и индуктивное  $X_L = 24$  Ом. Определить линейный ток  $I_{\lambda}$  и мощность  $P$ , потребляемую индуктивными катушками, если они будут включены в цепь по схема «звезда» и «треугольник».

*Решение*

1. Схема соединения индуктивных катушек «звездой» имеет следующий вид:



Фазное напряжение составит:

$$U_{\phi} = \frac{U_{\lambda}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} \approx 127 \text{ В.}$$

Фазный ток

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{127}{\sqrt{7^2 + 24^2}} \approx 5,08 \text{ A.}$$

При соединении «звездой» линейный ток равен фазному:

$$I_{\lambda} = I_{\phi} = 5,08 \text{ A.}$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{7}{\sqrt{7^2 + 24^2}} = 0,28.$$

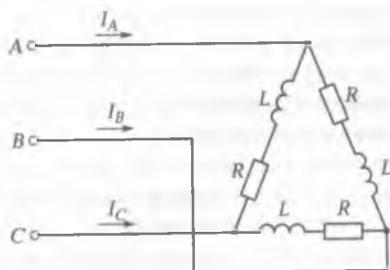
Мощность, потребляемая индуктивными катушками,

$$P = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi = 3 \cdot 127 \cdot 5,08 \cdot 0,28 = 542 \text{ Вт,}$$

или

$$P = \sqrt{3} U_{\lambda} I_{\lambda} \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 5,08 \cdot 0,28 = 542 \text{ Вт.}$$

2. Схема соединения индуктивных катушек «треугольником» имеет вид



Фазное напряжение в этом случае равно линейному напряжению:

$$U_{\phi} = U_{\lambda} = 220 \text{ В.}$$

Фазный ток

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} = \frac{220}{\sqrt{7^2 + 24^2}} = 8,8 \text{ A.}$$

Линейный ток

$$I_{\lambda} = \sqrt{3} I_{\phi} = \sqrt{3} \cdot 8,8 = 15,2 \text{ A.}$$

Мощность, потребляемая индуктивными катушками,

$$P = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi = 3 \cdot 220 \cdot 8,8 \cdot 0,28 = 1626 \text{ Вт.}$$

$$P = \sqrt{3} U_{\lambda} I_{\lambda} \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 15,2 \cdot 0,28 = 1626 \text{ Вт.}$$

При включении нагрузки по схеме «треугольник» потребление мощности увеличивается.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Как определяются активная, реактивная и полная мощность в трехфазной системе?
2. Как рассчитывается мощность при несимметричной системе напряжений или при неравномерной нагрузке фаз в трехфазной системе?
3. При какой схеме включения в трехфазной системе потребление мощности увеличивается или остается неизменным?



## ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

---

1. Напряжение генератора трехфазного тока равно 220 В. Ваттметр на щитке показывает 13,2 кВт. В линию включены «треугольником» лампы накаливания. Каждая из ламп потребляет ток 0,25 А. Определите число ламп, подключенных к генератору.
2. Электродвигатель трехфазного тока мощностью 12 кВт включен в сеть с напряжением 220 В. Коэффициент мощности двигателя равен 0,8. Найдите ток, потребляемый двигателем из сети.
3. Индуктивная катушка со стальным сердечником имеет активное сопротивление 4 Ом, индуктивное — 6 Ом. Установите, что покажет трехфазный ваттметр, если три одинаковые индуктивные катушки включить по схемам «звезда» и «треугольник».
4. Первая индуктивная катушка имеет активное сопротивление  $R_1 = 2$  Ом и индуктивное  $X_{L1} = 24$  Ом. У второй индуктивной катушки  $R_2 = 3$  Ом и  $X_{L2} = 16$  Ом, третья катушка имеет  $R_3 = 4$  Ом и  $X_{L3} = 30$  Ом. Индуктивные катушки соединены по схеме «треугольник» и включены в сеть с напряжением 220 В. Определите активную мощность, потребляемую тремя индуктивными катушками из сети.



## ТЕМЫ ДОКЛАДОВ И РЕФЕРАТОВ

---

1. Применение трехфазных и многофазных цепей переменного тока в промышленности.
2. Применение трехфазного тока в промышленности.

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

**К** В результате изучения данной главы вы должны:

- **уметь:**
  - устанавливать назначение измерительного прибора по его условному обозначению на электрических схемах;
  - расшифровывать условные обозначения на шкалах приборах;
  - выбирать необходимый тип прибора для проведения электрических измерений;
  - рассчитывать абсолютную, относительную и приведенную погрешности измерения;
- **знать:**
  - виды и методы электрических измерений, классификацию погрешностей;
  - классификацию электроизмерительных приборов;
  - способы расширения пределов измерения тока и напряжения;
  - схемы включения амперметров, вольтметров и ваттметров в электрическую цепь постоянного и переменного тока;
  - методы измерения параметров электрических цепей (сопротивления, индуктивности, емкости).

## 5.1. ВИДЫ И МЕТОДЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ

**→** Измерением называется познавательный процесс сравнения измеряемой физической величины с некоторым значением той же величины, принятым за единицу. Физические

величины измеряют техническими средствами — *средствами измерения*.

**В зависимости от способа получения результатов измерения** бывают прямыми и косвенными.

**В прямых измерениях** физическая величина измеряется непосредственно. Прямыми измерениями являются, например, измерение длины линейкой, времени — секундомером, силы тока — амперметром.

**В косвенных измерениях** непосредственно измеряют не ту величину, значение которой нужно узнать, а другие величины, с которыми искомая величина связана определенной математической зависимостью. Например, плотность тела определяют по измерению его массы и объема, а сопротивление вычисляют по закону Ома, т. е. по измерению силы тока и напряжения.

**В зависимости от способов и средств измерений** различают методы непосредственной оценки и методы сравнения.

**Метод непосредственной оценки** состоит в том, что значение измеряемой величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора (значение тока — по амперметру, значение напряжения — по вольтметру и др.). Этот метод оценки прост, но отличается сравнительно невысокой точностью.

**Метод сравнения** заключается в том, что измеряемая величина сравнивается с величиной, воспроизводимой мерой. Этот метод обеспечивает большую точность измерения по сравнению с методом непосредственной оценки, но процесс измерения усложняется.

В силу несовершенства организационных мер и измерительных приборов, а также наших органов чувств, измерения не могут быть выполнены точно, т. е. всякое измерение дает лишь приближенный результат. Кроме того, нередко причиной отклонения результатов измерений является природа самой измеряемой величины. Например, температура, измеряемая термометром или термопарой в определенной точке печи, колеблется вследствие конвекции и теплопроводности в определенных пределах. Мерой оценки точности результата измерения служит погрешность измерения.

**По способу выражения погрешности средств измерений** делятся на абсолютные, относительные и приведенные.

**Абсолютная погрешность  $\Delta$**  — это разность между показанием прибора  $A$  и действительным значением измеряемой величины  $A_{\Delta}$ :

$$\Delta = A - A_{\Delta}$$

**Относительная погрешность** — это отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины  $A_A$ , обычно выражается в процентах:

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{A_A} 100.$$

Чем меньше погрешность измерения, тем выше его точность.

**Приведенная погрешность**  $\gamma$  представляет собой отношение абсолютной погрешности  $\Delta$  к нормирующему значению  $A_N$  измеряемой величины:

$$\gamma = \pm \frac{\Delta}{A_N} 100.$$

**Нормирующее значение** обычно принимают равным верхнему пределу измерения для данного прибора.

По источникам происхождения погрешности измерения подразделяют на систематические, случайные и грубые (промахи).

**Систематические погрешности** — это погрешности измерения, величина которых остается постоянной при повторных измерениях, проводимых одним и тем же методом, с помощью одних и тех же измерительных приборов. Причинами систематических погрешностей являются:

- неисправности, неточности измерительных приборов;
- неправомерность, неточность методики измерения.

Примером систематических погрешностей может быть измерение температуры термометром со смещенной нулевой точкой, измерение тока неправильно отградуированным амперметром.

Для устранения или уменьшения систематических погрешностей нужно тщательно проверить измерительные приборы, произвести измерение одних и тех же величин разными методами, ввести поправки, когда ошибки заведомо известны (например, поправки на показания термометра).

**Случайная погрешность** — это погрешность, изменяющаяся по случайному закону. Случайные погрешности нельзя исключить опытным путем, значение их можно уменьшить проведением многократных измерений.

**Грубые погрешности (промахи)** — существенное превышение величины погрешности, ожидаемой при данных условиях измерения. Промахи появляются в результате неправильной записи показаний прибора, неправильного отсчета по прибору, из-за ошибки в расчетах при косвенных измерениях. Источник промахов — невнимательность экспериментатора. Путь устранения этих погреш-

ностей — аккуратность экспериментатора, исключение переписывания протоколов измерения.

**В зависимости от условий эксплуатации** различают основную и дополнительную погрешности средств измерений.

**Основная погрешность** — это погрешность средств измерений, находящихся в нормальных условиях эксплуатации (температура внешней среды, влажность, атмосферное давление, напряжение и частота питания, внешние электрические и магнитные поля и др.).

**Дополнительная погрешность** — это погрешность средств измерений, возникающая при отклонении указанных условий от нормального значения.

Уровень точности средств измерений характеризуется *классом точности*. Для электроизмерительных приборов установлены следующие классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 и 4. Цифры указывают основную приведенную погрешность  $\gamma$  в процентах.

**Пример 5.1.** Образцовый и лабораторный амперметры соединены последовательно. По показаниям лабораторного прибора  $I = 22$  А, по показаниям образцового  $I_A = 21,95$  А. Определить абсолютную, относительную и приведенные погрешности измерений, если верхний предел измерения лабораторного прибора  $A_N = 30$  А.

*Решение*

Абсолютная погрешность измерения

$$\Delta = A - A_A = 22,00 - 21,95 = 0,05 \text{ А.}$$

Относительная погрешность измерения

$$\delta = \pm \frac{\Delta}{A_A} 100 = \frac{0,05}{21,95} 100 \approx 0,3 \text{ \%}$$

Приведенная погрешность измерения

$$\gamma = \pm \frac{\Delta}{A_N} 100 = \frac{0,05}{30} 100 \approx 0,2 \text{ \%}$$

**Пример 5.2.** Вольтметр имеет класс точности 2,5 и предел измерения 30 В. Этим прибором были произведены два измерения  $U_1 = 6$  В и  $U_2 = 25$  В. Какое из измерений будет иметь наименьшую относительную погрешность?

*Решение*

Указанный класс прибора соответствует приведенной погрешности  $\gamma = 2,5$  %. Абсолютная погрешность измерения

$$\Delta = \gamma \frac{A_N}{100} = \frac{2,5 \cdot 30}{100} = 0,75 \text{ В.}$$

Определим действительные значения измеряемых величин:

$$A_{A1} = A_1 - \Delta = 6,00 - 0,75 = 5,25 \text{ В};$$

$$A_{A2} = A_2 - \Delta = 25,00 - 0,75 = 24,25 \text{ В}.$$

Рассчитаем относительные погрешности измерений:

$$\delta_1 = \pm \frac{\Delta}{A_{A1}} 100 = \frac{0,75}{5,25} 100 = 14,3 \%;$$

$$\delta_2 = \pm \frac{\Delta}{A_{A2}} 100 = \frac{0,75}{24,25} 100 = 3,1 \%.$$

Из решения очевидно, что второе измерение оказалось точнее.

Основными характеристиками электроизмерительных приборов являются: погрешность (см. ранее), вариация показаний, чувствительность, потребляемая мощность, время установления показаний и надежность.

**Вариация показаний** — это наибольшая разность показаний прибора при одном и том же значении измеряемой величины. Причиной вариации в основном является трение в опорах подвижной части прибора.

**Чувствительность  $S$**  — это отношение приращения перемещения указателя  $\Delta a$  к приращению измеряемой величины  $\Delta x$ :

$$S = \frac{\Delta a}{\Delta x}.$$

Если чувствительность постоянна (шкала равномерная), то ее можно определить как  $S = \frac{a}{x}$ .

Величина, обратная чувствительности ( $C = \frac{l}{S}$ ), называется *ценой деления* (постоянной) прибора. Она равна числу единиц измеряемой величины, приходящихся на одно деление шкалы.

**Потребляемая мощность** — это мощность, которую потребляет прибор при включении его в цепь. Большое потребление мощности приводит к увеличению погрешности измерения, поэтому малое потребление мощности является достоинством прибора.

**Время установления показаний** — это промежуток времени с момента включения измеряемой величины до момента, когда указатель займет положение, отличающееся от установившегося значения не более чем на 1,5%. Время установления показаний

для большинства аналоговых измерительных приборов не превышает 4 с.

**Надежность** — это способность электроизмерительных приборов сохранять заданные характеристики при определенных условиях работы в течение заданного времени. Количественной мерой надежности является среднее время безотказной или исправной работы прибора.

### **!** Запомните

- Измерение — это определение значения физической величины опытным путем.
- Из-за несовершенства средств и методов измерений, субъективных ошибок и случайных влияний результаты реальных измерений всегда будут отличаться от действительных значений измеряемых величин.
- Чем меньше измеряемая величина по сравнению с верхним пределом шкалы прибора, тем больше погрешность измерения.

### **?** КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется измерением?
2. В чем состоит отличие косвенного вида измерения от прямого? Приведите примеры косвенных измерений.
3. Каковы причины возникновения систематических погрешностей и пути их исключения?
4. В какой части шкалы прибора относительная погрешность измерения будет наибольшей?
5. Что является надежностью электроизмерительного прибора?

### **П** ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Предел измерения амперметра составляет 30 А. Этим амперметром измерены токи 5 А и 25 А. Установите, какое измерение точнее.
2. Рассчитайте относительную погрешность при измерении тока  $I = 2,5$  А амперметром класса точности 0,5 и пределом измерения прибора 5 А.
3. Определите абсолютную и относительные погрешности показания амперметра, включенного последовательно с сопротивлением  $R = 25$  Ом, если показание амперметра  $I = 4,5$  А, а напряжение на зажимах сопротивления  $U = 110$  В.

## КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Электроизмерительные приборы классифицируются по различным признакам, например по роду и принципу действия.

По **роду измеряемой величины** электроизмерительные приборы подразделяются на амперметры, вольтметры, омметры, ваттметры, частотомеры и др. На схемах и лицевой панели электроизмерительного прибора род измеряемой величины указывается с помощью условных обозначений, некоторые из них приведены в табл. 5.1, 5.2.

Таблица 5.1. Условные обозначения на электроизмерительных приборах

Прибор	Условное обозначение
Амперметр	A
Вольтметр	V
Гальванометр	Г
Ваттметр	W
Омметр	$\Omega$
Счетчик ватт-часов	Wh

Таблица 5.2. Условные обозначения на шкалах приборов

Условное обозначение	Назначение
~	Прибор переменного тока
—	Прибор постоянного тока
~	Прибор постоянного и переменного тока
≏	Прибор трехфазного тока
⊥	Вертикальное положение прибора при измерении
┌	Горизонтальное положение прибора при измерении

Условное обозначение	Назначение
 $30^\circ$	Положение прибора при измерении под углом $30^\circ$
1,5	Класс точности, например, 1,5
	Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, например, 2 кВ
2001	Год выпуска
31226	Заводской номер

В зависимости от физического явления, положенного в основу **принципа действия** измерительного прибора, различают приборы магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической и других систем.

Системы измерительных приборов, их условное обозначение, область применения, достоинства и недостатки приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3. Системы электроизмерительных приборов и их условные обозначения

Система прибора	Условное обозначение	Область применения	Достоинства и недостатки
Магнито-электрическая		Применяют для измерения постоянных токов, напряжений, сопротивлений и т. д.	<b>Достоинства:</b> высокая точность, равномерная шкала, обладает малым потреблением энергии от объекта.  <b>Недостатки:</b> непригодность к работе в цепях переменного тока, чувствительность к перегрузкам и зависимость показаний от температуры окружающей среды

Система прибора	Условное обозначение	Область применения	Достоинства и недостатки
Электромагнитная		Применяют для измерения в цепях постоянного и переменного тока в качестве амперметров, вольтметров и фазометров	<i>Достоинства:</i> самые распространенные щитовые приборы для измерения в цепях переменного тока. <i>Недостатки:</i> невысокая точность, большое собственное потребление мощности, ограниченный частотный диапазон, чувствительность к внешним магнитным полям
Электродинамическая		Применяют в цепях постоянного и переменного тока для измерения тока напряжения, мощности	<i>Достоинства:</i> высокая точность, независимость показаний от формы кривой тока и напряжения. <i>Недостатки:</i> сравнительно низкая чувствительность, большое собственное потребление мощности, влияние внешних магнитных полей, ограниченный частотный диапазон
Электростатическая		Применяют в качестве вольтметров постоянного и переменного тока	<i>Достоинства:</i> малое собственное потребление энергии, широкий частотный диапазон работы,

Условное обозначение	Назначение
	Положение прибора при измерении под углом 30°
1,5	Класс точности, например, 1,5
	Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, например, 2 кВ
2001	Год выпуска
31226	Заводской номер

В зависимости от физического явления, положенного в основу **принципа действия** измерительного прибора, различают приборы магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической и других систем.

Системы измерительных приборов, их условное обозначение, область применения, достоинства и недостатки приведены в табл. 5.3.

Таблица 5.3. Системы электроизмерительных приборов и их условные обозначения

Система прибора	Условное обозначение	Область применения	Достоинства и недостатки
Магнито-электрическая		Применяют для измерения постоянных токов, напряжений, сопротивлений и т. д.	<p><b>Достоинства:</b> высокая точность, равномерная шкала, обладает малым потреблением энергии от объекта.</p> <p><b>Недостатки:</b> непригодность к работе в цепях переменного тока, чувствительность к перегрузкам и зависимость показаний от температуры окружающей среды</p>

Система прибора	Условное обозначение	Область применения	Достоинства и недостатки
<p>Электромагнитная</p>		<p>Применяют для измерения в цепях постоянного и переменного тока в качестве амперметров, вольтметров и фазометров</p>	<p><i>Достоинства:</i> самые распространенные щитовые приборы для измерения в цепях переменного тока.</p> <p><i>Недостатки:</i> невысокая точность, большое собственное потребление мощности, ограниченный частотный диапазон, чувствительность к внешним магнитным полям</p>
<p>Электродинамическая</p>		<p>Применяют в цепях постоянного и переменного тока для измерения тока напряжения, мощности</p>	<p><i>Достоинства:</i> высокая точность, независимость показаний от формы кривой тока и напряжения.</p> <p><i>Недостатки:</i> сравнительно низкая чувствительность, большое собственное потребление мощности, влияние внешних магнитных полей, ограниченный частотный диапазон</p>
<p>Электростатическая</p>		<p>Применяют в качестве вольтметров постоянного и переменного тока</p>	<p><i>Достоинства:</i> малое собственное потребление энергии, широкий частотный диапазон работы,</p>

Система прибора	Условное обозначение	Область применения	Достоинства и недостатки
			<p>нечувствительность к внешним магнитным полям и колебаниям температуры; их показания не зависят от формы кривой измеряемого напряжения.</p> <p><i>Недостатки:</i> сравнительно низкая чувствительность</p>
Индукционная		Применяют в качестве одно- и трехфазных счетчиков переменного тока	<p><i>Достоинства:</i> устойчивы к перегрузкам, имеют большой вращающийся момент и малую чувствительность к внешним магнитным полям.</p> <p><i>Недостатки:</i> недостаточно чувствительны, и их показания зависят от частоты измеряемого тока и температуры окружающей среды</p>

К электроизмерительным приборам предъявляют следующие технические требования:

- точность и надежность в работе;
- потребление по возможности как можно меньшей мощности;
- способность не вносить заметных изменений в электрические параметры измеряемой цепи;
- равномерные деления в пределах рабочей части шкалы;
- способность выдерживать как можно большую перегрузку;

- продолжительный срок службы без ухудшения своих качеств;
- надежная изоляция токоведущих частей от корпуса;
- независимость показаний прибора от внешних факторов;
- малое время установления показаний прибора;
- низкая стоимость.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Приборы какой системы измеряют только постоянный ток и напряжение?
2. Приборы какой системы являются самыми распространенными щитовыми приборами для измерения в цепях переменного тока?
3. Приборы какой системы имеют чувствительность к внешним магнитным полям?

## 5.3. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

**Измерение тока.** Прибор, предназначенный для измерения силы тока, называется **амперметром**. Амперметр включается последовательно с участком цепи, в котором измеряется сила тока (рис. 5.1, а).

Для того чтобы включение амперметра не оказывало влияния на работу электрических установок и он не создавал больших потерь энергии, амперметры выполняют с малым внутренним сопротивлением. Амперметр можно включать в цепь только последовательно с нагрузкой.

Для расширения пределов измерения амперметров, предназначенных для работы в цепях постоянного тока, их включают в цепь

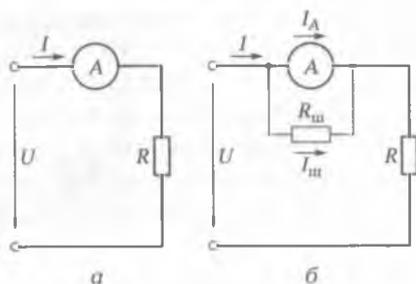


Рис. 5.1. Схема включения амперметра:

а — без шунта; б — с шунтом

параллельно шунту (рис. 5.1, б). При этом через прибор проходит только часть  $I_A$  измеряемого тока  $I$ , обратно пропорциональная его сопротивлению  $R_A$ . Большая часть  $I_{ш}$  этого тока проходит через шунт. Зная сопротивления прибора  $R_A$  и шунта  $R_{ш}$ , можно по току  $I_A$ , фиксируемому прибором, определить измеряемый ток:

$$I = I_A \frac{R_A + R_{ш}}{R_{ш}} = I_A n,$$

где  $n$  — коэффициент шунтирования,  $n = \frac{I}{I_A} = \frac{R_A + R_{ш}}{R_{ш}}$ . Его обычно выбирают равным или кратным 10.

Сопротивление шунта, необходимое для измерения тока  $I$ , в  $n$  раз большего, чем ток прибора  $I_A$ ,

$$R_{ш} = \frac{R_A}{n - 1}.$$

Конструктивно шунты либо монтируют в корпус прибора (шунты на токи до 50 А), либо устанавливают вне его и соединяют с прибором проводами. Если прибор предназначен для постоянной работы с шунтом, то шкала его градуируется сразу в значениях измеряемого тока с учетом коэффициента шунтирования и никакие расчеты для определения тока выполнять не требуется. Шунты делят на пять классов точности (0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5). Обозначение класса соответствует допустимой погрешности в процентах.

Для того чтобы повышение температуры шунта при прохождении по нему тока не оказывало влияния на показания прибора, шунты изготавливают из материалов с большим удельным сопротивлением и малым температурным коэффициентом (константан, манганин, никелин и пр.). Для уменьшения влияния температуры на показания амперметра последовательно с индукционной катушкой прибора в некоторых случаях включают добавочный резистор из константана или другого подобного материала. Для измерения больших токов (свыше 100 А) применяют амперметры магнитоэлектрической системы с использованием шунтов.

Для расширения пределов измерения тока в цепях переменного тока используют трансформаторы тока (ТТ) (рис. 5.2). Зна-

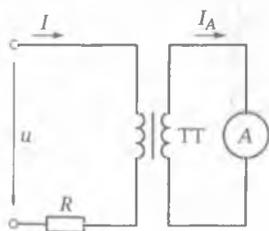


Рис. 5.2. Схема включения амперметра в цепь переменного тока с использованием измерительного ТТ

чение измеряемого тока  $I$  и значение  $I_A$ , измеряемое амперметром, связаны следующим соотношением:

$$I = kI_A,$$

где  $k$  — коэффициент трансформации измерительного трансформатора.

**Измерение напряжения.** Прибор, предназначенный для измерения напряжения, называется **вольтметром** (рис. 5.3, а). Вольтметр включается параллельно участку цепи, на котором измеряется напряжение (рис. 5.3, б).

Для того чтобы включение вольтметра не оказывало влияния на работу электрических установок и он не создавал больших потерь энергии, вольтметры выполняют с большим сопротивлением. Для расширения пределов измерения вольтметров последовательно с обмоткой прибора включают добавочный резистор  $R_A$  (рис. 5.3, в). При этом на прибор приходится лишь часть  $U_V$  измеряемого напряжения  $U$ , пропорциональная сопротивлению прибора  $R_V$ . Сопротивление добавочного резистора, необходимое для измерения напряжения  $U$ , в  $n$  раз большего напряжения прибора  $U_V$ , определяется по формуле

$$R_A = (n - 1)R_V.$$

Добавочный резистор может встраиваться в прибор и одновременно использоваться для уменьшения влияния температуры окружающей среды на показания прибора. Для этой цели резистор выполняется из материала, имеющего малый температурный коэффициент, и его сопротивление значительно превышает сопротивление индуктивной катушки, вследствие чего общее сопротивление прибора становится почти независимым от изменения температуры. По точности добавочные резисторы подразделяются на те же классы точности, что и шунты.

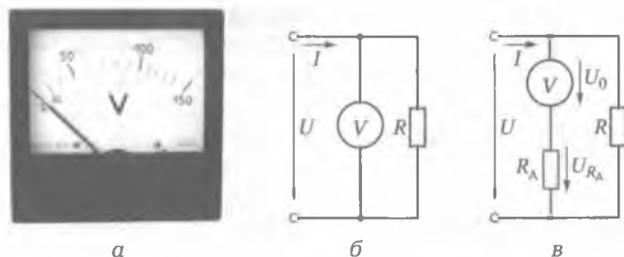


Рис. 5.3. Схема включения вольтметра:

а — внешний вид стрелочного вольтметра; б — без добавочного сопротивления; в — с добавочным сопротивлением

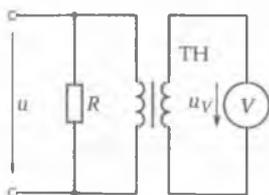


Рис. 5.4. Схема включения вольтметра в цепь переменного тока с использованием измерительного ТН

В цепях переменного тока для расширения пределов измерения вольтметров используются измерительные трансформаторы напряжения (ТН). Схема включения показана на рис. 5.4. В этом случае измеряемое напряжение  $U = k_u U_v$ , где  $k_u$  — коэффициент трансформации измерительного трансформатора напряжения. Измерительные трансформаторы напряжения, помимо расширения пределов измерения вольтметра в цепях переменного тока, обеспечивают изоляцию вторичной цепи от первичной, находящейся под высоким напряжением.

**Делители напряжения.** Для расширения пределов измерения вольтметров применяют делители напряжения. Они позволяют уменьшить подлежащее измерению напряжение до значения, соответствующего номинальному напряжению данного вольтметра (предельного напряжения на его шкале). Отношение входного напряжения делителя  $U_1$  к выходному  $U_2$  (рис. 5.5, а) называется **коэффициентом деления**. При холостом ходе  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$ . В делителях напряжения это отношение может быть выбрано равным 10, 100, 500 и т. д. в зависимости от того, к каким выводам делителя подключен вольтметр (рис. 5.5, б). Делитель напряжения вносит малую погрешность в измерения только в том случае, если сопротив-

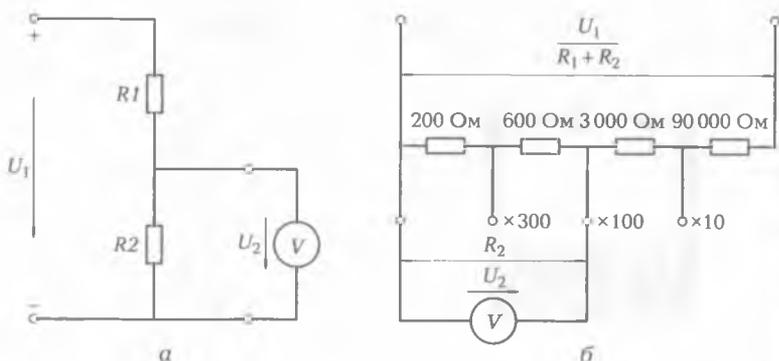


Рис. 5.5. Схемы включения делителей напряжения:

а — однопределный делитель напряжения; б — многопределный делитель напряжения

ление вольтметра  $R_V$  достаточно велико (ток, проходящий через делитель, мал), а сопротивление источника, к которому подключен делитель, мало.

### **!** Запомните

- При измерении переменных токов важно, какое значение тока измеряется: действующее, амплитудное или среднее. Все приборы градуируются в действующих значениях синусоидального тока.
- Чем меньше сопротивление амперметра, тем меньше погрешность измерения.
- Чем больше внутреннее сопротивление вольтметра, тем меньше погрешность измерения.
- Для расширения пределов измерения амперметра и вольтметра в цепях переменного тока применяют измерительные трансформаторы тока и напряжения.

### **?** КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как называется сопротивление, включаемое параллельно амперметру, для расширения его предела измерения?
2. Приборы какой системы применяют для измерения больших постоянных токов?
3. Из какого материала выполняют шунты для амперметра?

### **П** ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Амперметр класса точности 1 с пределом измерения 5 А и внутренним сопротивлением 0,09 Ом включен параллельно шунту, расширяющему пределы измерения до 50 А. Определите сопротивление шунта и максимально возможную погрешность измерения.
2. Найдите величину добавочного сопротивления, расширяющего в 10 раз предел измерения вольтметра с внутренним сопротивлением 20 кОм и пределом измерения 30 В.
3. Амперметр класса точности 2,5 с пределом измерения 15 А и внутренним сопротивлением 0,018 Ом включен параллельно шунту, расширяющему его предел измерения в 10 раз. Рассчитайте сопротивление шунта и максимально возможную абсолютную погрешность измерения.
4. Амперметр, включенный через измерительный трансформатор тока 150/5 А, показал 4 А. Определите ток в первичной цепи.

## 5.4. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

**Измерение мощности в цепях постоянного тока.** Мощность в электрических цепях измеряют прямым и косвенным способами. При прямом измерении используют ваттметры, а при косвенном — амперметры и вольтметры.

В цепях постоянного тока для измерения мощности ваттметр используют относительно редко, в основном применяют метод амперметра — вольтметра (рис. 5.6). Определив амперметром значение тока  $I$  и вольтметром напряжение  $U$ , вычисляют мощность по формуле

$$P = UI.$$

Для уменьшения погрешности, возникающей из-за влияния внутренних сопротивлений приборов, схему рис. 5.6, а используют при малом сопротивлении  $R$ , а схему рис. 5.6, б — при большом сопротивлении  $R$  нагрузки.

**Измерение мощности в цепях переменного тока.** Полную мощность  $S$  приемника измеряют, как правило, методом амперметра — вольтметра:

$$S = UI,$$

где  $U$ ,  $I$  — действующие значения напряжения и тока соответственно.

Активную  $P = UI \cos \varphi$  и реактивную  $Q = UI \sin \varphi$  мощности приемников измеряют с помощью ваттметров.

Измерение активной мощности ваттметром в однофазных цепях производят по схеме, представленной на рис. 5.7, а. Токовую обмотку включают в цепь последовательно с приемником  $R_n$  (т. е. в цепь тока), а обмотку напряжения — параллельно приемнику  $R_n$  на напряжение  $U$ .

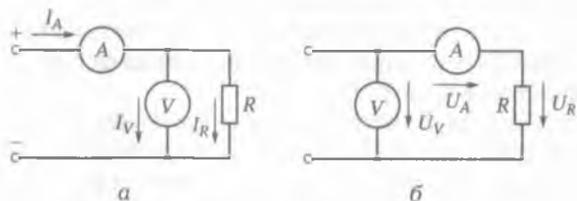


Рис. 5.6. Измерение мощности методом амперметра — вольтметра: а — при малом сопротивлении нагрузки; б — при большом сопротивлении нагрузки

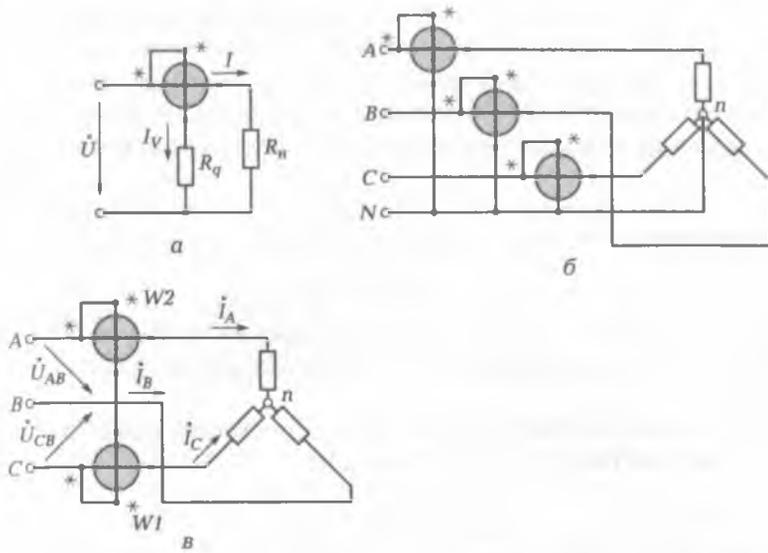


Рис. 5.7. Схемы измерения мощности:

*а* — в однофазной цепи переменного тока; *б* — в трехфазной четырехпроводной сети; *в* — в трехпроводной сети методом двух ваттметров

Реактивную мощность в однофазных цепях измеряют только в лабораториях при проведении каких-либо исследований включением обычных ваттметров по специальным схемам.

В трехфазной цепи переменного тока полная мощность приемника при симметричной нагрузке может быть измерена методом амперметра — вольтметра и вычислена по формуле

$$S = \sqrt{3}UI,$$

где  $U, I$  — действующие значения линейных напряжения и тока соответственно.

Полная мощность приемника при несимметричной нагрузке:

$$S = S_1 + S_2 + S_3,$$

где  $S_1, S_2, S_3$  — полные мощности фаз приемника.

При измерении активной мощности в трехфазной четырехпроводной цепи включают три ваттметра (рис. 5.7, б). Активная мощность приемника определяется суммой их показаний:

$$P = P_1 + P_2 + P_3.$$

Широко распространено измерение активной мощности в трехфазных цепях методом двух ваттметров. Этот метод используют только для трехпроводной цепи. Одна из возможных схем включения ваттметров  $W1$  и  $W2$  представлена на рис. 5.7, в. Сумма показаний ваттметров определяет активную мощность приемника:

$$P = \alpha_{W1} + \alpha_{W2}.$$

При симметричной нагрузке эта сумма представляется в виде

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi,$$

где  $U, I$  — действующие значения линейных напряжения и тока соответственно;  $\varphi$  — сдвиг фаз между фазным напряжением  $U_\phi$  и током  $I_\phi$ .

Реактивная мощность трехфазного приемника равна разности показаний ваттметров, умноженной на  $\sqrt{3}$ :

$$Q = \sqrt{3}(\alpha_{W1} - \alpha_{W2}).$$

При симметричной нагрузке реактивную мощность измеряют методом двух или трех ваттметров, включенных по специальным схемам.

**Измерение активной и реактивной энергии.** Активную энергию в цепях однофазного переменного тока измеряют индукционными счетчиками, включаемыми в цепь по тем же схемам, что и ваттметры. Активная энергия выражается в ватт-секундах или киловатт-часах. Для измерения активной энергии в системах энергоснабжения широко применяют двух- и трехэлементные счетчики. В трехфазных цепях реактивная энергия учитывается с помощью трехфазных трехэлементных счетчиков.

### **!** Запомните

- Электрическую мощность измеряют ваттметрами электродинамической или ферродинамической систем.
- Во избежание неправильного подключения ваттметра в контролируемую цепь начало измерительных цепей ваттметров отмечают знаком «звездочка». Эти зажимы называются *генераторными*, они должны быть подключены к одному полюсу источника электроэнергии.
- Для расширения пределов измерения ваттметров и счетчиков электроэнергии в их токовые цепи включают шунты или измерительные трансформаторы тока, а в цепи напряжения — добавочные сопротивления или трансформаторы напряжения.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие системы измерительных приборов могут быть использованы в качестве ваттметров?
2. Какой метод измерения мощности в основном применяют в цепях постоянного тока?
3. Как измеряют полную мощность в цепях переменного тока?

## 5.5. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

**Измерение методом амперметра—вольтметра.** Сопротивление какой-либо электрической установки или участка электрической цепи можно определить методом амперметра—вольтметра (рис. 5.8), пользуясь законом Ома. Этот метод является наиболее простым для измерения малых и средних сопротивлений.

При включении приборов по схеме, приведенной на рис. 5.8, а, через амперметр проходит не только измеряемый ток  $I_x$ , но и ток  $I_V$ , протекающий через вольтметр. Поэтому сопротивление

$$R_x = \frac{U}{I - U/R_V},$$

где  $R_V$  — сопротивление вольтметра.

При включении приборов по схеме, представленной на рис. 5.8, б, вольтметр будет измерять не только падение напряжения  $U_x$  на определенном сопротивлении, но и падение напряжения в обмотке амперметра  $U_A = IR_A$ . Поэтому

$$R_x = \frac{U}{I} - R_A,$$

где  $R_A$  — сопротивление амперметра.

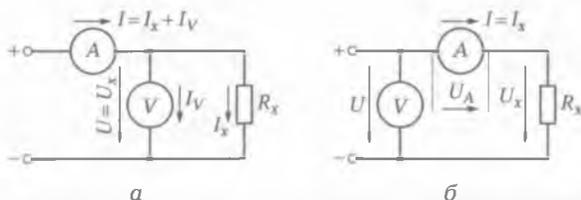


Рис. 5.8. Измерение сопротивления методом амперметра—вольтметра: а — схема для измерения малых сопротивлений; б — схема для измерения больших сопротивлений

В тех случаях когда сопротивления приборов неизвестны и, следовательно, не могут быть учтены, нужно при измерении малых сопротивлений пользоваться схемой рис. 5.8, а, а при измерении больших сопротивлений — схемой рис. 5.8, б. При этом погрешность измерений, определяемая в первой схеме током  $I_V$ , а во второй — падением напряжения  $U_A$ , будет невелика по сравнению с током  $I_x$  и напряжением  $U_x$ .

**Измерение сопротивлений электрическими мостами.** Мостовая схема состоит из источника питания, чувствительного прибора (гальванометра  $\Gamma$ ) и четырех резисторов, включаемых в плечи моста: с неизвестным сопротивлением  $R_x$  (резистор  $R_4$ ) и известными сопротивлениями  $R_1, R_2, R_3$ , которые могут при измерениях изменяться (рис. 5.9, а).

Прибор включают в одну из диагоналей моста (измерительную), а источник питания — в другую (питающую).

Сопротивления  $R_1, R_2$  и  $R_3$  можно подобрать такими, что при замыкании контакта В показания прибора будут равны нулю (в таком случае принято говорить, что мост уравновешен). При этом неизвестное сопротивление

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_3.$$

В некоторых мостах отношение плеч  $\frac{R_1}{R_2}$  установлено постоянным, а равновесие моста достигается только подбором сопротивле-

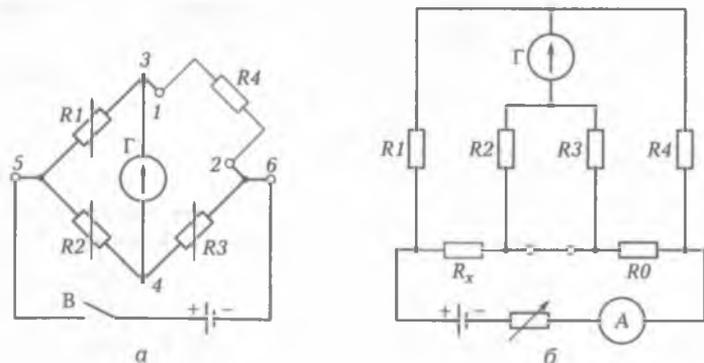


Рис. 5.9. Мостовые схемы постоянного тока, применяемые для измерения сопротивлений:

а — мостовая схема постоянного тока; б — двойной мост постоянного тока для измерения малых сопротивлений

ния  $R_3$ . В других, наоборот, сопротивление  $R_3$  постоянно, а равновесие достигается подбором сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$ .

Существуют различные конструкции мостов постоянного тока, при использовании которых не требуется выполнять вычисления, так как неизвестное сопротивление  $R_x$  отсчитывают по шкале прибора. Смонтированные в них магазины сопротивлений позволяют измерять сопротивления от 10 до 100 000 Ом.

При измерении малых сопротивлений обычными мостами сопротивления соединительных проводов и контактных соединений вносят большие погрешности в результаты измерения. Для их устранения применяют двойные мосты постоянного тока (рис. 5.9, б). В этих мостах провода, соединяющие резистор с измеряемым сопротивлением  $R_x$  и некоторый образцовый резистор с сопротивлением  $R_0$  с другими резисторами моста, и их контактные соединения оказываются включенными последовательно с резисторами соответствующих плеч, сопротивление которых устанавливается не менее 10 Ом. Поэтому они практически не влияют на результаты измерений. Провода же, соединяющие резисторы с сопротивлениями  $R_x$  и  $R_0$ , входят в цепь питания и не влияют на условия равновесия моста. Поэтому точность измерения малых сопротивлений довольно высока. Мост выполняют так, чтобы при регулировках его соблюдались следующие условия:  $R_1 = R_2$  и  $R_3 = R_4$ . В этом случае

$$R_x = \frac{R_0 R_1}{R_4}.$$

Двойные мосты позволяют измерить сопротивления от 0,000001 до 10 Ом.

Если мост не уравновешен, то стрелка в гальванометре будет отклоняться от нулевого положения, так как ток измерительной диагонали при неизменных значениях сопротивлений  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и ЭДС источника тока будет зависеть только от изменения сопротивления  $R_x$ . Это позволяет проградуировать шкалу гальванометра в единицах сопротивления  $R_x$  или каких-либо других единицах (температура, давление и пр.), от которых зависит это сопротивление. Поэтому неуравновешенный мост постоянного тока широко используют в различных устройствах для измерения незлектрических величин электрическими методами.

**Измерение омметром.** Омметр представляет собой миллиамперметр 1 с магнитоэлектрическим измерительным механизмом и включается последовательно с измеряемым сопротивлением  $R_x$  (рис. 5.10) и добавочным резистором  $R_A$  в цепь постоянного тока. При неизменных ЭДС источника и сопротивления резистора  $R_A$  ток

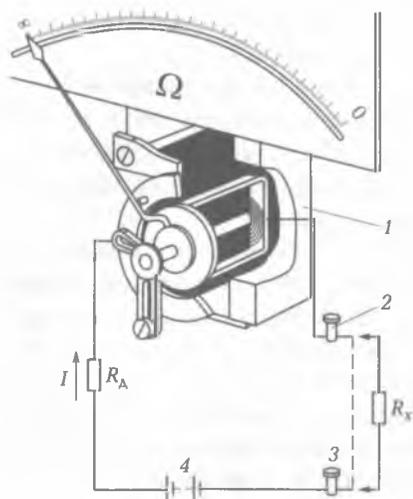


Рис. 5.10. Схема включения омметра:

1 — миллиамперметр; 2, 3 — зажимы прибора; 4 — сухой гальванический элемент

в цепи зависит только от сопротивления  $R_x$ . Это позволяет отградуировать шкалу прибора непосредственно в омах. Если выходные зажимы прибора 2 и 3 замкнуты накоротку (см. штриховую линию), то ток  $I$  в цепи максимален и стрелка прибора отклоняется вправо на наибольший угол; на шкале этому соответствует сопротивление, равное нулю. Если цепь прибора разомкнута, то  $I = 0$  и стрелка находится в начале шкалы; этому положению соответствует сопротивление, равное бесконечности.

Питание прибора осуществляется от сухого гальванического элемента 4, который устанавливается в корпусе прибора. Прибор будет давать правильные показания только в том случае, если источник тока имеет неизменную ЭДС (такую же, как и при градуировке шкалы прибора). В некоторых омметрах имеются два или несколько пределов измерения, например от 0 до 100 Ом и от 0 до 10 000 Ом. В зависимости от этого резистор с измеряемым сопротивлением  $R_x$  подключают к различным зажимам.

Омметры удобны на практике, но имеют большую погрешность из-за неравномерности шкалы и нестабильности источника питания. Для измерения сопротивления изоляции чаще всего применяют мегомметры магнитоэлектрической системы.

**Измерение сопротивления заземления.** Для измерения сопротивления изоляции отдельных частей электротехнических установок по отношению к «земле» и друг относительно друга применяют мегомметры. Согласно правилам сопротивление изоляции проводов должно быть не менее чем 1 000 Ом на каждый вольт ра-

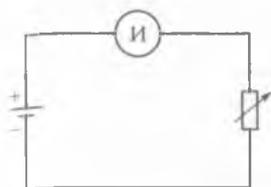


Рис. 5.11. Схема градуировки стрелочного мегомметра



Рис. 5.12. Внешний вид современного мегомметра

бочего напряжения. Например, для сети с рабочим напряжением 220 В сопротивление изоляции должно быть не менее 220 000 Ом, или 0,22 МОм.

Стрелочные мегомметры, показания которых зависят от напряжения, состоят из источника напряжения и измерителя. Если последовательно в цепь включить регулируемое сопротивление  $R$ , то показания измерителя (вольтметра) будут зависеть от величины этого сопротивления (при постоянном напряжении цепи). При  $R = 0$  показание вольтметра будет наибольшим, при  $R = \infty$  вольтметр покажет нуль. Включая в цепь различные сопротивления, можно отградуировать шкалу измерителя непосредственно в омах (килоомах, мегаомах) (рис. 5.11).

В настоящее время применяются электронные мегомметры (рис. 5.12).

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими способами измеряют сопротивление резисторов постоянному току?
2. Какой метод является наиболее простым для измерения малых и средних сопротивлений?
3. Почему омметры имеют большую погрешность измерения?
4. Какие приборы применяют для измерения сопротивления изоляции?

## 5.6. ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ

Индуктивность  $L$  и емкость  $C$  в основном измеряются косвенным методом с помощью амперметра, вольтметра и ваттметра. Для более точных результатов применяют мостовой метод.

Метод амперметра — вольтметра — ваттметра (рис. 5.13) является наиболее доступным при определении параметров пассивных двухполюсников. Результаты измерений действующих значений тока  $I$ , напряжения  $U$  и мощности  $P$  позволяют вычислить полное сопротивление  $Z_x = U/I$ , активное сопротивление  $R = P/I^2$  и реактивное сопротивление  $X = \sqrt{Z_x^2 - R^2}$ .

Если измеряемой величиной является индуктивность, то она определяется по формуле

$$L = \frac{X_L}{\omega},$$

а если емкость, то по следующей формуле:

$$C = \frac{1}{\omega X_C}.$$

Для измерения индуктивности и емкости также широко применяется **мостовой метод**. Схема моста, применяемого для определения параметров индуктивной катушки ( $R_x, L_x$ ), приведена на рис. 5.14. При уравнивании моста омическое сопротивление провода обмотки индуктивной катушки

$$R_x = \frac{R_1 R_2}{R_3},$$

Измеряемая индуктивность

$$L_x = C_3 R_1 R_2,$$

где  $C_3$  — образцовая (эталонная) емкость.

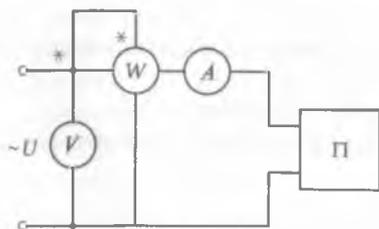


Рис. 5.13. Схема измерения индуктивности и емкости методом амперметра — вольтметра — ваттметра:

П — пассивный двухполюсник

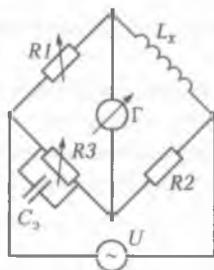
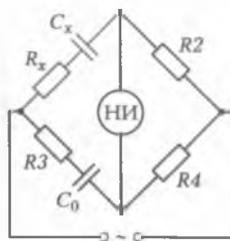


Рис. 5.14. Схема моста для измерения индуктивности

Рис. 5.15. Схема моста для измерения емкости:  
НИ — нулевой индикатор



Погрешность мостовых методов измерения составляет около 1—3%; пределы измерения — 0,1—1 000 Гн.

Схема моста для измерения емкости  $C_x$  и сопротивления  $R_x$  конденсатора с малыми потерями приведена на рис. 5.15. Обеспечивая условие равновесия моста, получаем выражения:

$$C_x = C_0 \frac{R_4}{R_2}; \quad R_x = \frac{R_2 R_3}{R_4}.$$



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой метод измерения индуктивности и емкости является наиболее точным?
2. Можно ли измерить индуктивность катушки, используя только амперметр и вольтметр?
3. В чем сложность и ограниченность применения мостового метода для измерения индуктивности и емкости?

## 5.7. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ И СДВИГА ФАЗ

**Измерение частоты.** Измерение частоты является одной из важнейших задач измерительной техники. Для этой цели используют методы непосредственной оценки и метод сравнения. В области низких частот (до 2 кГц) для измерения частоты применяют электромеханические частотомеры. Для измерения высоких частот используют электронные аналоговые и цифровые частотомеры. Частоту нередко измеряют осциллографом (рис. 5.16).

При измерениях *методом непосредственной оценки* не требуется дополнительных измерительных приборов. В соответствии с инструкцией по эксплуатации осциллографа производят калибровку длительности развертки и подают исследуемый сигнал на «Вход Y». Переключением частоты развертки и регулировкой



Рис. 5.16. Внешний вид осциллографа двухлучевого

уровня синхронизации добиваются устойчивого изображения сигнала на экране. Измеряют целое число периодов сигнала (в делениях), укладывающихся на линии горизонтальной развертки, и определяют частоту исследуемого сигнала, Гц, по формуле

$$f = \frac{n}{lT_p}$$

где  $n$  — число периодов исследуемого сигнала;  $l$  — длина линии развертки (в делениях масштабной сетки), на которой укладывается возможно большее целое число периодов исследуемого сигнала;  $T_p$  — коэффициент развертки в исследуемом диапазоне, с/дел.

Измерение частоты этим способом не требует, как отмечено ранее, других измерительных приборов, но не обладает высокой точностью.

Для измерений **методом сравнения** дополнительно требуется генератор сигналов. Измерения производят методом *фигур Лиссажу*.

Сигнал известной частоты от генератора сигналов подают на «Вход X» осциллографа, исследуемый сигнал — на «Вход Y». Генератор горизонтальной развертки выключают. Органами управления устанавливают приблизительно одинаковые размахи отклонения луча по горизонтали и вертикали. Изменяя частоты генератора сигналов, стараются получить на экране фигуру Лиссажу первого порядка — эллипс или круг (рис. 5.17). При этом частоты исследуемого сигнала и генератора оказываются равными. Значение измеренной частоты считывают со шкалы генератора.

Если максимальное значение частоты имеющегося генератора ниже частоты исследуемого сигнала, можно воспользоваться более сложными фигурами Лиссажу, получаемыми на экране осциллографа при кратном соотношении частот.

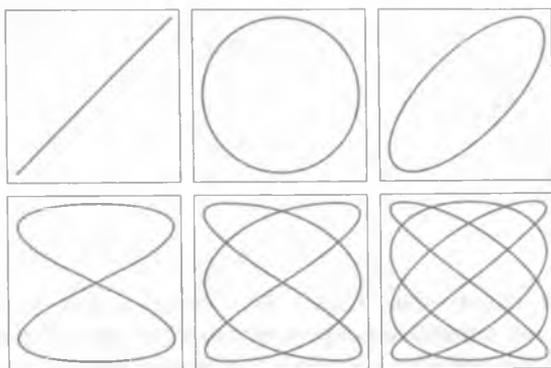


Рис. 5.17. Фигуры Лиссажу

Расшифровывают подобные осциллограммы следующим образом. Регулировками положения луча по вертикали и горизонтали перемещают фигуру Лиссажу так, чтобы горизонтальная и вертикальная линии масштабной сетки экрана оказались касательными к боковой и нижней (верхней) сторонам фигуры (рис. 5.18). Подсчитывают число точек касания фигуры с линиями сетки. Отношение числа этих точек показывает отношение частот генератора  $f_r$  и исследуемого  $f$  сигналов. Например, для фигуры, изображенной на рис. 5.18, соотношение частот  $f$  и  $f_r$  равно  $5 : 2$ , поэтому частоту исследуемого сигнала находят по формуле

$$f = \frac{5f_r}{2}.$$

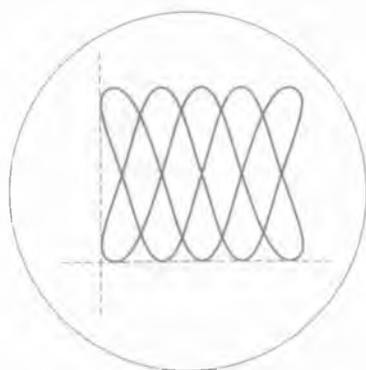


Рис. 5.18. Фигура Лиссажу при соотношении частот исследуемого и эталонного сигналов  $5:2$

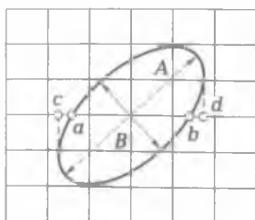


Рис. 5.19. Измерение сдвига фаз методом эллипса

**Измерение сдвига фаз.** Сдвиг фаз между двумя напряжениями определяется *методами непосредственной оценки* и *сравнения* при исследовании различного рода четырехполюсников (трансформаторов, фильтров, усилителей и др.) в заданном диапазоне частот, а также зависимости сдвига фаз от частоты. Сдвиг фаз выражается в радианах или градусах.

Наиболее распространены для измерения сдвига фаз электродинамический (на низких частотах), электронный, цифровой фазометры и осциллограф (на высоких частотах).

Способ оценки сдвига фаз между двумя напряжениями с помощью электронно-лучевого осциллографа *методом эллипса* демонстрируется на рис. 5.19.

Одно из исследуемых напряжений  $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$  подают на вход  $Y$ , а другое  $u_2 = U_{2m} \sin \omega t$  — на вход  $X$  электронно-лучевого осциллографа. На экране появится фигура — эллипс. Центр эллипса совмещают с началом координат. Находят точки пересечения эллипса с осями и определяют максимальную абсциссу (ординату). При  $t = 0$  и  $t = 2\pi/\omega$  напряжение  $u_1 = 0$ , а напряжение  $u_2 = \pm U_{2m} \sin \varphi$ . Отрезок  $ab$  эллипса пропорционален  $2U_{2m} \sin \varphi$ , а отрезок  $cd$ , соответствующий максимальному отклонению луча по горизонтали, пропорционален  $2U_{2m}$ . В этом случае

$$\varphi = \arcsin \frac{ab}{cd}.$$

Можно вычислить сдвиг по фазе и по отношению большой  $B$  и малой  $A$  осей эллипса:

$$\varphi = 2 \arctg \frac{B}{A}.$$

Погрешность измерения сдвига фаз осциллографом составляет 5—10% и определяется неточностью отсчета длин отрезков, деформацией эллипса из-за наличия высших гармоник в исследуемых напряжениях, наличием собственного сдвига фаз в каналах прибора.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Каковы способы измерения частоты?
2. Каким образом по фигуре Лиссажу на экране осциллографа можно определить неизвестную частоту?
3. В чем состоит суть способа измерения сдвига фаз методом эллипса?



## ТЕМЫ ДОКЛАДОВ И РЕФЕРАТОВ

---

1. Назначение и типы электроизмерительных приборов.
2. Измерение электрическими методами неэлектрических величин.
3. Способы расширения пределов измерения электроизмерительных приборов и их реализация.
4. Тенденции развития аналоговых измерительных приборов.
5. Тенденции развития цифровых измерительных приборов.
6. Использование микропроцессорной техники в развитии цифровых измерительных приборов.

# ТРАНСФОРМАТОРЫ

**К**

В результате изучения данной главы вы должны:

■ **уметь:**

- определять основные параметры трансформатора;
- составлять электрические схемы для измерения параметров трансформатора;
- составлять электрические схемы для включения трехфазных трансформаторов в электрическую цепь;
- рассчитывать КПД трансформатора по его характеристикам;

■ **знать:**

- назначение, устройство, принцип действия и область применения трансформаторов;
- основные параметры трансформатора;
- схему включения трансформатора в электрическую цепь;
- электрическую схему, достоинства и недостатки, область применения автотрансформаторов;
- схемы включения и область применения трехфазных трансформаторов.

### 6.1.

## ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО ТРАНСФОРМАТОРА



**Трансформатором** называется статический (без движущихся частей) электромагнитный аппарат, преобразующий переменный ток одного напряжения в переменный ток той же частоты, но другого напряжения.

Трансформаторы используют в системах передачи и распределения электроэнергии, а также для получения различных уровней

напряжения на производстве и в быту. Их применение обеспечивает экономичную передачу электроэнергии к потребителям, передача ведется при повышенном напряжении, что позволяет уменьшить сечение проводов линий электропередачи (ЛЭП) и потери мощности в них.

30 ноября 1876 г. — дата получения патента русским ученым-изобретателем П. Н. Яблочковым, считается датой рождения первого трансформатора. Это был трансформатор с разомкнутым сердечником, представлявшим собой стержень, на который наматывались обмотки. Первые трансформаторы с замкнутыми сердечниками были созданы в Англии в 1884 г. братьями Джоном и Эдуардом Гопкинсон.

По назначению трансформаторы делятся на силовые и специального назначения (измерительные, сварочные, согласующие и др.). Силовые трансформаторы бывают одно- и трехфазные, повышающие и понижающие. Условные графические обозначения трансформаторов даны на рис. 6.1.

Трансформатор состоит из стального замкнутого **магнитопровода** и двух или нескольких индуктивно связанных между собой **обмоток**.

Магнитопровод необходим для усиления электромагнитной связи между обмотками. Схематическое устройство двухобмоточного трансформатора представлено на рис. 6.2.

Внешний вид однофазного трансформатора представлен на рис. 6.3.

Обмотка, включенная в сеть источника электрической энергии, называется **первичной**; обмотка, от которой электрическая энергия подается к приемнику, — **вторичной**. Для уменьшения потерь от вихревых токов магнитопровод трансформатора собирают из листов электротехнической стали толщиной 0,35 или 0,5 мм. Листы

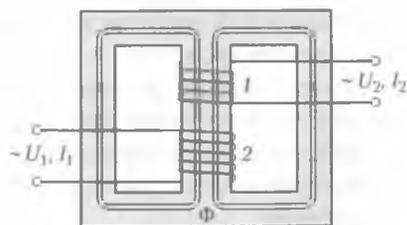
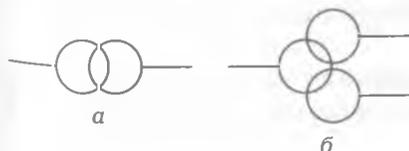


Рис. 6.1. Условные графические обозначения трансформаторов:

а — двухобмоточного; б — трехобмоточного

Рис. 6.2. Схематическое устройство трансформатора:

1 — первичная обмотка; 2 — вторичная обмотка



Рис. 6.3. Внешний вид однофазного трансформатора

дов круглого или прямоугольного сечения. Обмотка, соединенная с сетью более высокого напряжения, называется **обмоткой высшего напряжения** (ВН), а другая — **обмоткой низшего напряжения** (НН).

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции.

Принцип действия трансформатора рассмотрим на примере однофазного двухобмоточного трансформатора (см. рис. 6.2). В трансформаторе имеются две индуктивно связанные обмотки: **первичная** с числом витков  $w_1$  и **вторичная** с числом витков  $w_2$ . При подключении первичной обмотки к источнику переменного напряжения  $U_1$  по ней будет протекать ток  $I_1$ , который возбудит в сердечнике трансформатора переменный магнитный поток  $\Phi$ . Этот поток, пронизывая витки обмоток трансформатора, будет индуцировать в них ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ , величина которых зависит от числа витков обмоток ( $w_1$  и  $w_2$ ), амплитуды магнитного потока и частоты его изменения. Если вторичную обмотку замкнуть на какой-либо приемник электрической энергии  $Z$ , то по этой обмотке и через приемник  $Z$  будет протекать ток  $I_2$ .

Электрическая энергия, трансформируясь, передается из первичной цепи во вторичную цепь.

Действующие значения ЭДС, индуцируемые в первичной и вторичной обмотках трансформатора, определяются следующими выражениями:

$$E_1 \cong 4,44w_1f\Phi;$$

$$E_2 \cong 4,44w_2f\Phi,$$

где  $w_1, w_2$  — число витков первичной и вторичной обмоток соответственно;  $f$  — частота тока;  $\Phi$  — амплитуда магнитного потока в сердечнике.

Потоки рассеяния и падения напряжения в сопротивлениях обмоток трансформатора достаточно малы, поэтому приближенно можно считать, что напряжения на зажимах первичной  $U_1$  и вторичной  $U_2$  обмоток равны ЭДС этих обмоток, т. е.  $U_1 \approx E_1$  и  $U_2 \approx E_2$ .

При холостом ходе трансформатора (отсутствии нагрузки на выходе) оба напряжения практически не отличаются по величине от соответствующих ЭДС. Отношение напряжений на зажимах первичной и вторичной обмоток трансформатора при холостом ходе называется **коэффициентом трансформации** и обозначается буквой  $k$ :

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Таким образом, 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 число витков вторичной обмотки меньше числа витков первичной, то в той же мере напряжение на зажимах вторичной обмотки меньше напряжения первичной обмотки и трансформатор является **понижающим**. Если же число витков вторичной обмотки больше числа витков первичной, то и напряжение вторичной обмотки больше напряжения первичной и трансформатор окажется **повышающим**.

**Пример 6.1.** Определить ЭДС первичной обмотки  $E_1$  трансформатора, включенного в электрическую сеть промышленной частоты 50 Гц. Амплитуда магнитного потока в сердечнике трансформатора  $\Phi = 0,01$  Вб, а число витков первичной обмотки равно 100.

*Решение*

Электродвижущая сила составит:

$$E_1 = 4,44w_1f\Phi = 4,44 \cdot 100 \cdot 50 \cdot 0,01 = 222 \text{ В.}$$



### Запомните

- Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции.
- Электрическая энергия, трансформируясь, передается из первичной сети трансформатора во вторичную сеть.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой электротехнический прибор называется трансформатором?
2. В чем состоит принцип работы трансформатора?
3. Какова область применения трансформаторов?
4. На каком явлении основано действие трансформатора?
5. Какие меры принимают для уменьшения вихревых токов в магнитопроводе трансформатора?



## ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Однофазный трансформатор включен в сеть 220 В. Первичная обмотка трансформатора имеет 800 витков, вторичная — 40. Вычислите коэффициент трансформации и напряжение на вторичной обмотке.
2. Рассчитайте напряжение сети, в которую можно включить однофазный трансформатор с напряжением на вторичной обмотке 400 В и коэффициентом трансформации 20,5.
3. Определите амплитуду магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора, если число витков в первичной обмотке  $w_1 = 800$ , напряжение  $U_1 = 440$  В, площадь сечения магнитопровода  $S = 18$  см<sup>2</sup>, частота переменного тока  $f = 50$  Гц.

## 6.2. РАБОЧИЙ РЕЖИМ ТРАНСФОРМАТОРА

В *рабочем режиме* работы трансформатора по его обмоткам  $w_1$  и  $w_2$  проходят токи  $I_1$  и  $I_2$  при напряжениях на обмотках  $U_1$  и  $U_2$ , а в *номинальном рабочем режиме* — номинальные токи  $I_{1н}$  и  $I_{2н}$  при номинальных напряжениях  $U_{1н}$  и  $U_{2н}$ .

Пренебрегая падением напряжения в первичной обмотке трансформатора, можно считать, что  $U_1 \cong E_1$ . Тогда при неизменном по значению напряжении  $U_1 = U_{1н}$  при любой нагрузке трансформатора ЭДС  $E_1$  постоянна. Так как ЭДС  $E_1$  зависит от магнитного потока ( $E_1 = 4,44w_1f\Phi$ ), то и магнитный поток при любой нагрузке можно считать постоянным.

Ток  $I_2$ , проходящий во вторичной обмотке трансформатора, создает свой магнитный поток, который, согласно правилу Ленца, направлен встречно магнитному потоку первичной обмотки и стремится его уменьшить. Чтобы результирующий магнитный поток оставался неизменным, магнитный поток вторичной обмотки должен быть уравновешен магнитным потоком первичной обмотки,

поэтому при увеличении тока  $I_2$  увеличивается и ток  $I_1$ . Магнитные потоки, создаваемые этими токами, уравновешиваются, и результирующий магнитный поток в сердечнике сохраняет практически неизменное значение.

Если пренебречь потерями в трансформаторе, то можно считать равными мощности трансформатора, потребляемую из сети и отдаваемую потребителю:

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2$$

Тогда

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} = k.$$

В *понижающем трансформаторе*  $U_1 > U_2$  в  $k$  раз;  $I_1 < I_2$  также в  $k$  раз.

В *повышающем трансформаторе* соотношение обратное.

### **!** Запомните

При  $k \geq 1$  трансформатор понижающий, а при  $k \leq 1$  — повышающий. Трансформатор является обратимым прибором, поэтому любой трансформатор может быть использован и как повышающий, и как понижающий.

Загрузка трансформатора в рабочем режиме оценивается коэффициентом нагрузки

$$\beta = \frac{P_2}{S_n \cos \varphi} = \frac{I_2}{I_{2н}}$$

где  $P_2$  — полезная мощность трансформатора;  $S_n$  — номинальная полная мощность трансформатора;  $\cos \varphi$  — коэффициент мощности.

**Пример 6.2.** При холостом ходе напряжение на входе однофазного трансформатора  $U_1 = 4$  кВ, а на выходе  $U_2 = 220$  В. При номинальной нагрузке трансформатор потребляет из сети полную мощность  $S_1 = 25$  кВ·А. Определить ток  $I_2$  во вторичной цепи трансформатора (ток нагрузки). Потери в трансформаторе пренебречь.

*Решение*

Определяем коэффициент трансформации:

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{4000}{220} = 18,18 \approx 18,2.$$

Ток в первичной обмотке

$$I_1 = \frac{S_1}{U_1} = \frac{25\,000}{4\,000} = 6,25 \text{ А.}$$

Ток во вторичной обмотке

$$I_2 = I_1 k = 6,25 \cdot 18,2 = 113,75 \text{ А.}$$



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется коэффициентом трансформации и как его определить?
2. Почему при увеличении нагрузки трансформатора увеличивается ток первичной обмотки?
3. Каким коэффициентом оценивается работа трансформатора при нагрузке?
4. Изменится ли ток в первичной обмотке трансформатора, если при изменении нагрузки увеличился ток во вторичной обмотке?



## ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Определите коэффициент трансформации однофазного трансформатора, подключенного к сети напряжением 220 В, если потребляемая мощность трансформатора составляет 2,2 кВт, а ток во вторичной обмотке — 2,5 А.
2. Однофазный трансформатор номинальной мощностью  $S_n = 33 \text{ кВ} \cdot \text{А}$  имеет число витков первичной обмотки 180 и вторичной — 104. Напряжение на зажимах первичной обмотки  $U_1 = 380 \text{ В}$ . Найдите напряжение на вторичной обмотке.

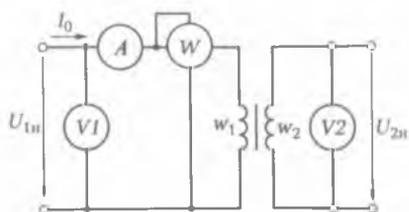
## 6.3. ОПЫТ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Основными способами испытания трансформатора являются опыт холостого хода и опыт короткого замыкания.

При опыте **холостого хода** трансформатора (рис. 6.4) его вторичная обмотка разомкнута и тока в этой обмотке нет ( $I_2 = 0$ ), а первичная обмотка включена в сеть источника электрической энергии переменного тока.

В таких условиях в первичной обмотке протекает ток холостого хода  $I_0$ , который представляет собой малую величину по сравнению

Рис. 6.4. Схема опыта холостого хода трансформатора



с номинальным током трансформатора. В трансформаторах больших мощностей ток холостого хода может достигать значений порядка 5—10 % номинального тока, в трансформаторах малых мощностей — 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. Активная мощность, потребляемая трансформатором при холостом ходе, расходуется на покрытие потерь мощности в магнитопроводе, называемых потерями на гистерезис и потерями на вихревые токи. Так как реактивная мощность при холостом ходе трансформатора значительно больше активной мощности, то коэффициент мощности ( $\cos \varphi$ ) достаточно мал и обычно равен 0,2—0,3.

По данным опыта холостого хода трансформатора определяют:

- силу тока холостого хода  $I_0$ ;
- потери в стали магнитопровода на гистерезис и вихревые токи  $P_{ст}$ ;
- коэффициент трансформации  $k$ .

Сила тока холостого хода  $I_0$  измеряется амперметром, включенным в цепь первичной обмотки трансформатора.

Потери в стали магнитопровода  $P_{ст}$  измеряются ваттметром, включенным в цепь первичной обмотки трансформатора. Это делается на том основании, что потери в проводниках первичной обмотки вследствие малой силы тока холостого хода незначительны и ими можно пренебречь и считать, что при холостом ходе вся мощность затрачивается только на потери в стали.

Коэффициент трансформации трансформатора определяется отношением показаний вольтметров, включенных в цепь первичной и вторичной обмоток.

При опыте **короткого замыкания** вторичная обмотка трансформатора замкнута накоротко, т. е. напряжение на зажимах вторичной обмотки равно нулю (рис. 6.5). Следует различать короткое замыкание в условиях эксплуатации и опыта.

В **условиях эксплуатации** короткое замыкание — аварийный режим, при котором в трансформаторе выделяется большое коли-

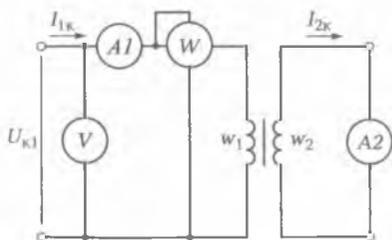


Рис. 6.5. Схема опыта короткого замыкания трансформатора

чество теплоты и создаются большие механические усилия, способные его разрушить.

**Опыт** короткого замыкания производят при таком первичном напряжении, чтобы значения токов  $I_1$  и  $I_2$  обмоток трансформатора не превышали номинальных. Такое пониженное напряжение называется **напряжением короткого замыкания**. Обычно оно составляет 5—10% номинального значения.

По данным опыта короткого замыкания определяют напряжение короткого замыкания, потери на нагревание обмоток трансформатора при номинальной нагрузке  $P_{об}$ , активное реактивное и полное сопротивления трансформатора при коротком замыкании.

**Пример 6.3.** Максимальный магнитный поток в сердечке однофазного трансформатора равен 0,001 Вб. При холостом ходе замерено напряжение на вторичной обмотке, равное 220 В. Число витков первичной обмотки  $w_1 = 300$ .

Частота сети составляет 50 Гц. Определить коэффициент трансформации и напряжение питающей сети.

*Решение*

При холостом ходе ЭДС вторичной обмотки трансформатора равна замеренному напряжению  $U_2 = 220$  В. Определяем число витков трансформатора на вторичной обмотке:

$$w_2 = \frac{E_2}{4,44f\Phi_m} = \frac{220}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,01} = 99.$$

Коэффициент трансформации

$$k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{300}{99} \approx 3.$$

Электродвижущая сила первичной обмотки трансформатора

$$E_1 = kE_2 = 3 \cdot 220 = 660 \text{ В.}$$

При холостом ходе напряжение питающей сети незначительно отличается от ЭДС первичной обмотки трансформатора:

$$U_1 \approx E_1 = 660 \text{ В.}$$



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие параметры трансформатора определяют по данным опыта холостого хода?
2. Какие параметры трансформатора определяют по данным опыта короткого замыкания?
3. Какую мощность измеряет ваттметр, включенный в первичную обмотку при холстом ходе трансформатора?
4. Что показывает ваттметр, включенный в цепь первичной обмотки трансформатора в опыте короткого замыкания?



## ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. При опыте холостого хода однофазного трансформатора замерены напряжения на первичной обмотке  $U_1 = 36$  В и на вторичной  $U_2 = 220$  В при частоте в сети 50 Гц. Определите коэффициент трансформации трансформатора, потребляемую мощность  $P_1$ , число витков на первичной и вторичной обмотках, если максимальный магнитный поток в сердечнике трансформатора составляет 0,001 Вб.
2. Однофазный трансформатор номинальной мощностью  $S = 20$  кВ·А включен в сеть с напряжением 220 В и частотой 50 Гц. При холостом ходе трансформатора напряжение на зажимах вторичной обмотки  $U_{2x} = 24$  В. Определите коэффициент трансформации и число витков в первичной и вторичной обмотках, если максимальный магнитный поток в сердечнике трансформатора составляет 0,002 Вб.
3. В опыте короткого замыкания трансформатора измерены: потребляемая мощность  $P_x = 50$  Вт, токи в первичной и вторичной цепях  $I_{1к} = 10$  А,  $I_{2к} = 2,5$  А. В опыте холостого хода того же трансформатора измерены потребляемая мощность  $P_x = 15$  Вт, напряжение питания  $U_1 = 120$  В. Определите КПД трансформатора при номинальной нагрузке и коэффициент трансформации.

## 6.4. ВНЕШНЯЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И КПД ТРАНСФОРМАТОРА

Рабочие свойства трансформатора характеризуются зависимостью напряжения на нагрузке  $U_2$  и КПД  $\eta$  от тока нагрузки  $I_2$ .



Зависимость  $U_2 = f(I_2)$  при различном характере нагрузки (активной, индуктивной, емкостной) называется **внешней характеристикой трансформатора**.

Внешняя характеристика трансформатора  $U_2 = f(I_2)$  и зависимость  $\eta = f(I_2)$  могут быть получены опытным и расчетным путем.

Вид зависимости  $U_2 = f(I_2)$  определяется характером нагрузки. Так, при емкостном характере нагрузки ( $\cos \varphi < 0$ ) с ростом тока  $I_2$  напряжение  $U_2$  возрастает, а при индуктивном характере ( $\cos \varphi > 0$ ) падает (рис. 6.6).

**К** коэффициентом полезного действия (КПД), или *отдачи трансформатора*, называется отношение полезной мощности трансформатора  $P_2$  к мощности, потребляемой им из сети источника электрической энергии  $P_1$ :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Потребляемая мощность  $P_1$  всегда больше полезной  $P_2$ , так как при работе трансформатора происходит потеря преобразуемой им энергии. Потери в трансформаторе складываются из потерь в стали магнитопровода  $\Delta P_{ст}$  и потерь в обмотках  $\Delta P_{об}$ .

Таким образом, потребляемую трансформатором мощность можно определить следующим выражением:

$$P_1 = P_2 + \Delta P_{ст} + \Delta P_{об}$$

Полезная мощность однофазного трансформатора

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi = \beta S_H \cos \varphi,$$

где  $\beta$  — коэффициент нагрузки;  $S_H$  — полная мощность трансформатора, В·А.

Следовательно, КПД для однофазного трансформатора

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi}{U_2 I_2 \cos \varphi + \Delta P_{ст} + \Delta P_{об}}$$

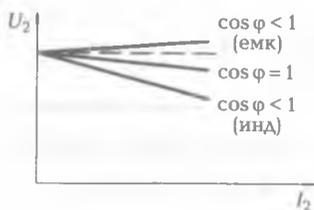


Рис. 6.6. Зависимость  $U_2 = f(I_2)$  от характера нагрузки (внешняя характеристика трансформатора)

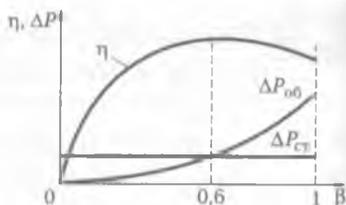


Рис. 6.7. Зависимости  $\Delta P_{ст}$ ,  $\Delta P_{об}$  и  $\eta$  от коэффициента нагрузки  $\beta$

Зависимости  $\Delta P_{\text{ст}}$ ,  $\Delta P_{\text{об}}$  и  $\eta$  от коэффициента нагрузки  $\beta$  представлены на рис. 6.7.

Наибольший КПД трансформатора будет при нагрузке, для которой потери в стали магнитопровода равны потерям в обмотках. у современных трансформаторов КПД достаточно высокий и достигает при полной нагрузке 95—99,5%.

Из графика зависимости  $\eta = f(\beta)$  видно, что при начальном нагружении трансформатора КПД резко возрастает, а затем меняется очень мало, достигая при некотором значении  $\beta$  максимума.

### **!** Запомните

- Потери в стали магнитопровода  $\Delta P_{\text{ст}}$  зависят от марки стали, из которой выполнен магнитопровод, от частоты переменного тока и магнитной индукции в магнитопровode. Так как частота тока сети и магнитная индукция не изменяются при работе трансформатора, то и потери в стали не зависят от нагрузки и остаются постоянными и равны потерям холостого хода.
- Прохождение токов по обмоткам трансформатора вызывает потери мощности в обмотках, пропорциональные квадрату коэффициента загрузки трансформатора.

**Пример 6.4.** Однофазный трансформатор при активной нагрузке потребляет из сети мощность  $P_1 = 16$  кВт. Коэффициент полезного действия трансформатора составляет 0,95, ток в первичной обмотке  $I_1 = 1,6$  А, коэффициент трансформации  $k = 4$ . Определить напряжение на входе и выходе трансформатора.

*Решение*

Напряжение на входе трансформатора

$$U_1 = \frac{P_1}{I_1} = \frac{16\,000}{1,6} = 10\,000 \text{ В.}$$

Мощность, потребляемая нагрузкой (мощность на выходе трансформатор),

$$P_2 = P_1 \eta = 16\,000 \cdot 0,95 = 15\,200 \text{ Вт.}$$

Ток нагрузки

$$I_2 = I_1 k = 1,6 \cdot 4 = 6,4 \text{ А.}$$

Напряжение на выходе трансформатора

$$U_2 = \frac{P_2}{I_2} = \frac{15\,200}{6,4} = 2\,375 \text{ В.}$$



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется коэффициентом полезного действия трансформатора?
2. От чего зависят потери в стали магнитопровода трансформатора?
3. От чего зависят потери мощности в обмотках трансформатора?



## ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Мощность, потребляемая трансформатором из сети при активной нагрузке,  $P_1 = 500$  Вт. Напряжение сети составляет 100 В, коэффициент трансформации — 10. Определите ток нагрузки.
2. Трансформатор мощностью  $P_2 = 50$  кВ · А имеет потери в стали  $P_{ст} = 350$  Вт и потери в обмотках при полной нагрузке (100 %)  $P_{об} = 1325$  Вт. Рассчитайте КПД при нагрузках 100, 75 и 50 %.

## 6.5. ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Для трансформации трехфазного тока можно использовать три однофазных трансформатора, обмотки которых могут быть соединены по схеме «звезда» или «треугольник». Однако на практике применяют трехфазные трансформаторы (рис. 6.8, а) с общим для всех фаз магнитопроводом.

Конструктивно обмотки трехфазных трансформаторов выполняются так же, как и обмотки однофазных. Начала фаз обмоток высшего напряжения обозначаются буквами А, В и С, а концы фаз обмоток высшего напряжения — X, Y и Z.

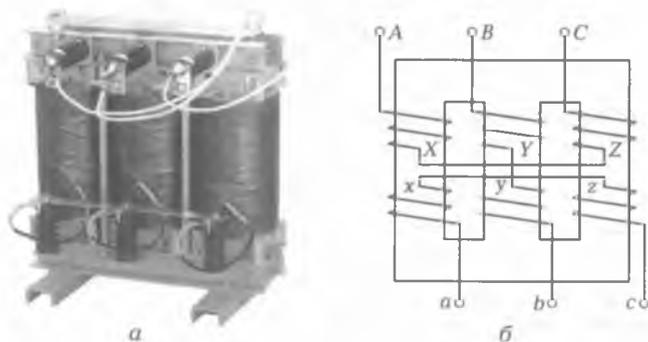


Рис. 6.8. Трехфазный стержневой трансформатор:

а — внешний вид; б — схема трехфазного стержневого трансформатора

Если обмотка высшего напряжения имеет выведенную нулевую точку, то этот зажим обозначается буквой *O*.

Зажимы обмоток низшего напряжения обозначаются буквами: *a*, *b*, *c* — начала фаз и *x*, *y*, *z* — концы фаз; *O* — вывод нулевой точки.

Основными способами соединения обмоток трехфазного трансформатора являются соединения «звездой» и «треугольником».

При соединении **обмоток по схеме «звезда»** концы (или начала) всех трех фаз соединяются между собой, образуя общую 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 по схеме «треугольник»** 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 **обеих обмоток в «звезду»** является самым простым и дешевым, поскольку каждая из обмоток и ее изоляция (при заземленной нейтрали) должны быть рассчитаны только на фазные напряжения и линейный ток. Соединение «звезда» — «треугольник» применяют для трансформаторов большой мощности в тех случаях, когда на стороне низшего напряжения не требуется нейтральный провод.

Отношение линейных напряжений зависит от способа соединений обмоток трансформатора. При схемах соединений обмоток «звезда» или «треугольник» отношения напряжений равны коэффициенту трансформации; при схемах «звезда» — «треугольник» и «треугольник» — «звезда» отношения напряжений соответственно больше и меньше этого коэффициента в  $\sqrt{3}$  раз.

Соединение обмоток трехфазных трансформаторов звездой обозначается *Y*, а треугольником —  $\Delta$ .

Группа соединения *Y/Y—0*, где 0 указывает на совпадение фазы *a* вторичной обмотки с фазой *A* первичной обмотки, показана на рис. 6.9, а. Схема соединения *Y/\Delta—11* показана на рис. 6.9, б. Здесь цифры 11 указывают, что вектор напряжения  $U_{AB}$  первичной обмотки опережает по фазе

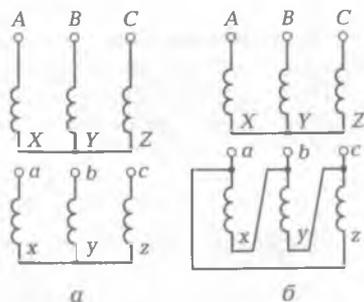


Рис. 6.9. Группа соединений обмоток трехфазного трансформатора:

а — *Y/Y—0*; б — *Y/\Delta—11*

$U_{ab}$  вторичной обмотки на  $30^\circ$  и совпадает с положением часовой стрелки на цифрах 11.

**Пример 6.5.** Трехфазный трансформатор с номинальной (расчетной) мощностью  $S_n = 30$  кВ·А, с линейным входным и линейным выходным напряжениями  $U_{\lambda 1} = 660$  В и  $U_{\lambda 2} = 400$  В, фазным напряжением на выходе  $U_{\phi 2} = 230$  В имеет потери при холостом ходе  $\Delta P_{ct} = 160$  Вт, потери при коротком замыкании  $\Delta P_{oc} = 580$  Вт. Обмотки высшего напряжения соединены в «звезду», начала и концы обмоток низшего напряжения выведены на доску зажимов, что позволяет соединять эти обмотки «звездой» или «треугольником».

Определить коэффициент трансформации фазных напряжений, коэффициент трансформации линейных напряжений при соединении обмоток низшего напряжения в «звезду» и «треугольник», КПД при номинальной нагрузке и двух значениях коэффициента мощности:  $\cos \varphi = 1$  и  $\cos \varphi = 0,7$ .

*Решение*

Фазное напряжение на входе трехфазного трансформатора

$$U_{\phi 1} = \frac{U_{\lambda 1}}{\sqrt{3}} = \frac{660}{\sqrt{3}} = 380 \text{ В.}$$

Коэффициент трансформации фазных напряжений

$$k = \frac{U_{\phi 1}}{U_{\phi 2}} = \frac{380}{230} \cong 1,65.$$

При соединении вторичных обмоток «звездой» линейное напряжение на выходе  $U_{\lambda 2} = 400$  В, следовательно, коэффициент трансформации линейных напряжений

$$k_{\lambda} = \frac{U_{\lambda 1}}{U_{\lambda 2}} = \frac{660}{400} = 1,65;$$

$$k = k_{\lambda} = 1,65.$$

Это равенство выполняется всегда, когда группы соединений первичных и вторичных обмоток одинаковы.

При соединении вторичных обмоток «треугольником» линейное напряжение будет равно фазному и, следовательно:

$$k_{\lambda} = \frac{U_{\lambda 1}}{U_{\phi 2}} = \frac{660}{230} \cong 2,9.$$

Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \frac{P}{P + \Delta P_{ct} + \Delta P_{oc}} = \frac{S \cos \varphi}{S \cos \varphi + \Delta P_{ct} + \Delta P_{oc}},$$

где  $\Delta P_{ct}$  — потери в магнитопроводе, измеренные в опыте холостого хода;  $\Delta P_{oc}$  — потери меди обмоток, измеренные в опыте короткого замыкания.

Определим КПД трансформатора.

При  $\cos \varphi = 1$

$$\eta = \frac{30\,000 \cdot 1}{30\,000 \cdot 1 + 160 + 580} \cong 0,98.$$

При  $\cos \varphi = 0,7$

$$\eta = \frac{30\,000 \cdot 0,7}{30\,000 \cdot 0,7 + 160 + 580} \cong 0,96.$$

Видим, что при прочих равных условиях уменьшение  $\cos \varphi$  приводит к уменьшению КПД.

### **!** Запомните

- Основным способом соединения обмоток трехфазного трансформатора являются соединения «звездой» и «треугольником».
- Соединение обмоток в «звезду» является самым простым и дешевым.
- Соединение «звезда»—«треугольник» применяют для трансформаторов большой мощности.

### **?** КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как соединяются обмотки трехфазных трансформаторов?
2. Какое соединение обмоток трехфазного трансформатора является самым простым и дешевым?
3. Какое соединение обмоток трехфазного трансформатора применяют для трансформаторов большой мощности?

### **П** ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. При соединении обмоток трехфазного трансформатора по схеме  $Y/Y$  коэффициент трансформации линейных напряжений равен 2. Определите коэффициент трансформации линейных напряжений при соединении обмоток  $Y/\Delta$ .
2. Линейное напряжение на входе трехфазного трансформатора  $U_{л1} = 660$  В, линейное напряжение на выходе  $U_{л2} = 220$  В. Первичные обмотки соединены по схеме «треугольник», вторичные — по схеме «звезда». Найдите линейный и фазный коэффициенты трансформации.
3. Трехфазный мощный трансформатор имеет потери холостого хода 0,12 кВт, потери короткого замыкания 0,6 кВт. Определите КПД трансформатора при активной нагрузке в номинальном режиме и коэффициенте мощности  $\cos \varphi = 0,9$ .

## 6.6. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

В конструктивном отношении автотрансформатор подобен трансформатору (рис. 6.10, а). На стальном магнитопроводе помещаются 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 напряжения автотрансформатора имеется не только магнитная, но и электрическая связь (рис. 6.10, б).

Электроэнергия в автотрансформаторах передается не только электромагнитным путем, но и за счет непосредственной электрической связи между обмотками.

Напряжения и токи в автотрансформаторе связаны теми же соотношениями, как и в обычном трансформаторе:

$$\frac{U_1}{U_2} \cong \frac{w_1}{w_2} \cong \frac{I_2}{I_1}$$

Токи  $I_1$  и  $I_2$  противоположны по фазе, поэтому в общей части обмотки  $w_2$  протекает ток

$$I_{12} = I_2 - I_1$$

Для всей передаваемой мощности, называемой *проходной*, можно записать:

$$S = U_2 I_2 = U_2 (I_1 + I_{12}) = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = S_3 + S_p$$

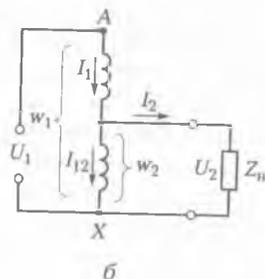


Рис. 6.10. Автотрансформатор:

а — внешний вид; б — принципиальная схема

где  $S_3$  — мощность, передаваемая из обмотки  $w_1$  в обмотку  $w_2$  благодаря электрической связи;  $S_p$  — расчетная мощность, передаваемая магнитным путем.

Расчетная мощность определяет размеры магнитопровода и, так как она составляет лишь часть проходной, при изготовлении автотрансформатора можно использовать магнитопровод меньшего сечения, чем при создании обычного трансформатора той же мощности. Это позволяет экономить сталь.

**Преимуществом автотрансформатора** перед трансформатором той же полезной мощности является меньший расход активных материалов — обмоточного провода и стали магнитопровода, меньшие потери энергии, более высокий КПД, меньшее изменение напряжения при изменениях нагрузки.

Однако наряду с преимуществами автотрансформаторов перед трансформаторами они имеют существенные **недостатки**:

- малое сопротивление короткого замыкания, что обуславливает большую кратность тока короткого замыкания, т. е. он во много раз больше номинального тока;
- возможность перехода высшего напряжения в сеть низшего напряжения в результате наличия электрической связи между этими сетями;
- наличие электрической связи между сетью источника и приемника энергии, что делает невозможным применять автотрансформатор в случае, когда приемник энергии имеет заземленный полюс (в выпрямительных устройствах);
- опасность поражения током лиц, пользующихся распределительной сетью. Кроме того, обе цепи (первичная и вторичная) должны быть одинаково изолированы по отношению к земле, что ведет к удорожанию сети.

Преимущества автотрансформаторов тем значительнее, чем их коэффициент трансформации ближе к единице, поэтому автотрансформаторы применяют при небольших коэффициентах трансформации ( $k = 1 - 2$ ).

### ! Запомните

- Электроэнергия в автотрансформаторах передается не только электромагнитным путем, но и за счет непосредственной электрической связи обмоток.
- Преимущества автотрансформаторов существенны лишь при малых коэффициентах трансформации.

**Пример 6.6.** Автотрансформатор включен в сеть с напряжением  $U_1 = 220$  В. Напряжение на вторичных зажимах  $U_2 = 180$  В, ток нагрузки  $I_2 = 10$  А. Обмотка имеет 600 витков. Определить коэффициент трансформации автотрансформатора, ток, потребляемый из сети, и число витков, к которым подсоединена нагрузка.

*Решение*

Коэффициент трансформации автотрансформатора

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{220}{180} = 1,22.$$

Ток, потребляемый из сети,

$$I_1 = \frac{I_2}{k} = \frac{10}{1,22} = 8,1 \text{ А.}$$

Число витков, к которым присоединена нагрузка,

$$w_2 = \frac{w_1}{k} = \frac{600}{1,22} \approx 492.$$



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит существенное отличие автотрансформатора от трансформатора?
2. Какая мощность определяет размер магнитопровода автотрансформатора?
3. Каковы достоинства и недостатки автотрансформаторов?



## ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Автотрансформатор мощностью  $10 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ , напряжением  $220/200$  В имеет число витков первичной обмотки 110. Определите коэффициент трансформации автотрансформатора, число витков вторичной обмотки, ток в первичной обмотке и ток, отдаваемый автотрансформатором в нагрузку.
2. Автотрансформатор имеет КПД 96 %, включен в сеть напряжением 127 В. В его вторичной обмотке протекает ток 8 А при напряжении 140 В. Найдите ток в первичной обмотке и на общей части витков автотрансформатора.



## ТЕМЫ ДОКЛАДОВ И РЕФЕРАТОВ

1. Назначение и принцип действия специальных трансформаторов.
2. Трансформаторы специального назначения (по профилю профессии).
3. Применение трехфазных трансформаторов в технике.
4. Схемы включения трансформаторных групп.

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

**К** В результате изучения данной главы вы должны:

■ **уметь:**

- определять параметры и режимы работы электрических двигателей по их характеристикам;
- составлять принципиальные электрические схемы пуска, регулирования частоты и торможения электрических двигателей;
- составлять принципиальные схемы включения двигателей постоянного тока с последовательным, параллельным, смешанным и независимым возбуждением;
- строить внешнюю и регулировочную характеристики генератора постоянного тока;

■ **знать:**

- классификацию, устройство и принцип действия электрических машин;
- принцип обратимости электрических машин;
- способы получения магнитного поля возбуждения в электрических машинах;
- устройство и принцип действия асинхронных двигателей;
- пуск в ход и регулирование частоты вращения асинхронных двигателей;
- принцип действия, устройство синхронных машин;
- принцип действия и область применения машин постоянного тока;
- схемы включения обмотки возбуждения генератора постоянного тока;
- пуск в ход и регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока.

## 7.1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Электрические машины широко используют на электрических станциях, в промышленности, на транспорте, в авиации, системах автоматического регулирования и управления. Такие машины преобразуют механическую энергию в электрическую, и наоборот.

➔ Машина, преобразующая механическую энергию в электрическую, называется **генератором**, а машина, преобразующая электрическую энергию в механическую, называется **двигателем**.

➔ Электрическая машина также может служить 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**.

Электрические машины делятся на **машины постоянного и переменного тока**. Машины переменного тока могут быть как одно-, так и многофазными. Наибольшее применение нашли трехфазные синхронные и асинхронные машины.

Принцип действия электрических машин основан на физических законах **электромагнитной индукции и электромагнитных сил**. Согласно этим законам, а также законам Ома, Джоуля — Ленца можно получить основные соотношения между величинами, характеризующими рабочий процесс в электрических машинах.

Два полюса электромагнита, создающего магнитное поле, показаны на рис. 7.1. В магнитном поле между полюсами помещен проводник, сечение которого изображено кружком. Если в магнитном поле полюсов постоянных магнитов или электромагнитов поместить проводник и под действием какой-либо силы  $F$  перемещать его, то в нем возникает ЭДС, значение которой определяется формулой

$$e = Blv,$$

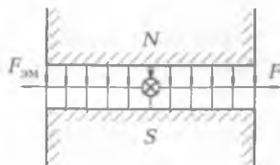


Рис. 7.1. Принцип действия электрической машины

где  $B$  — магнитная индукция в месте, где находится проводник;  $l$  — активная длина проводника, т. е. та часть, которая находится в магнитном поле;  $v$  — скорость перемещения проводника в магнитном поле.

Это соотношение предполагает, что проводник перемещается перпендикулярно направлению магнитных сил линий поля.

Направление ЭДС определяется правилом правой руки.

Если этот проводник замкнуть на какое-либо сопротивление приемника электрической энергии, то в замкнутой цепи под действием ЭДС будет протекать электрический ток, совпадающий по направлению с ЭДС в проводнике.

В результате взаимодействия тока  $I$  в проводнике с магнитным полем создается электромагнитная сила  $F_{эм}$ , направление которой определяется по правилу левой руки, т. е. эта сила будет направлена навстречу силе, перемещающей проводник в магнитном поле.

При равенстве сил  $F = F_{эм}$  проводник будет перемещаться с постоянной скоростью.

В такой простейшей электрической машине механическая энергия, затрачиваемая на перемещение проводника, преобразуется в электрическую энергию, т. е. такая машина работает **генератором**.

Если от постороннего источника электрической энергии через проводник пропустить ток, то в результате взаимодействия тока в проводнике с магнитным полем полюсов создается электромагнитная сила  $F_{эм}$ , под действием которой проводник начнет перемещаться в магнитном поле, преодолевая силу торможения какого-либо механического приемника энергии. В таком режиме машина будет работать **двигателем**.

В режиме **генератора** (рис. 7.2) электромагнитный момент  $M_{эм}$  противодействует вращению, уравниваясь моментом  $M_{AB}$  первичного приводного двигателя (турбина, дизель и т.п.). В режиме **двигателя** электромагнитный момент  $M_{эм}$  действует по направлению вращения (рис. 7.3). При равномерном вращении ему противодействует момент сопротивления  $M_c$  приводимого в движение механического устройства (станок, насос, вентилятор и т.п.).

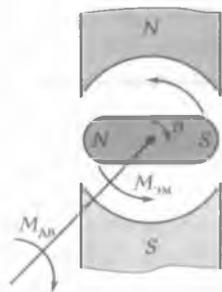


Рис. 7.2. Работа электрической машины в режиме генератора

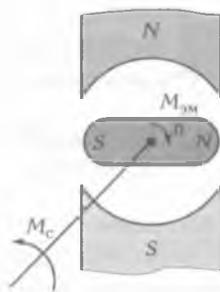


Рис. 7.3. Работа электрической машины в режиме двигателя



Любая электрическая машина может быть использована в качестве как генератора, так и двигателя. Это свойство электрической машины изменять направление преобразуемой ею энергии называется **обратимостью машины**.

Принцип обратимости электрических машин был установлен русским академиком Э. Ленцем в 1833 г.

Конструктивно электрическая машина состоит из двух основных частей: вращающейся — **ротора** (от лат. *rotor* — вращающийся) и неподвижной — **статора** (от лат. *stator* — стоящий).



### Запомните

- Наличие магнитного поля и проводников с током является необходимым условием для работы электрической машины как преобразователя энергии, а постоянное взаимодействие между ними достигается вращательным движением.
- Электрическая машина обладает принципом обратимости, т. е. может работать и как генератор, и как двигатель.



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

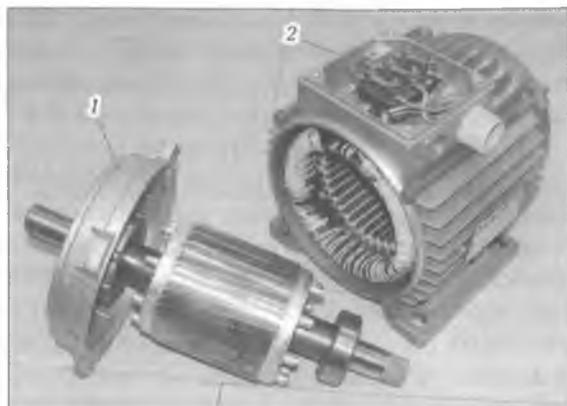
1. На каком физическом законе основан принцип действия электрических машин?
2. Какая электрическая машина называется генератором?
3. Какая электрическая машина называется двигателем?
4. Какие электрические машины называются преобразователями?
5. В чем состоит суть принципа обратимости электрической машины?

## 7.2. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

### 7.2.1. АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Наибольшее распространение среди электрических двигателей получил трехфазный асинхронный двигатель, впервые сконструированный известным русским электриком М. О. Доливо-Добровольским в 1889 г. Этот двигатель практически не подвергался серьезным изменениям до наших дней.

Рис. 7.4. Асинхронная машина:  
1 — ротор; 2 — статор



Асинхронный двигатель отличается простотой конструкции и несложностью обслуживания. Так же как и любая машина переменного тока, асинхронный двигатель состоит из ротора 1 и статора 2 (рис. 7.4). Асинхронная машина может работать в режиме как двигателя, так и генератора. Однако из-за ряда существенных недостатков асинхронные генераторы практически не применяются. Различают несколько типов асинхронных двигателей: трех-, двух-, однофазные и линейные. Промышленностью выпускаются асинхронные двигатели с широким диапазоном мощностей: от нескольких ватт до нескольких мегаватт. За прошедшие годы асинхронные двигатели нашли очень широкое применение в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства. Их используют в электроприводе металлорежущих станков, подъемно-транспортных машин, транспортеров, насосов, вентиляторов. Маломощные двигатели используются в устройствах автоматики.

Принципиальным недостатком асинхронных двигателей являются трудности, связанные с регулированием частоты вращения. Кроме того, эти двигатели имеют относительно низкий коэффициент мощности  $\cos \varphi$  (0,85—0,90 при полной нагрузке и 0,2—0,3 на холостом ходу).

Асинхронные двигатели — самые распространенные двигатели на производстве и в быту.

### 7.2.2. УСТРОЙСТВО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Асинхронный двигатель состоит из неподвижной части — статора и вращающейся части — ротора. Частями статора являются магнитопровод и корпус. Сердечник собран из изолированных листов

электротехнической стали. С внутренней стороны полый цилиндр сердечника статора снабжен пазами, в которые закладывается статорная обмотка (рис. 7.5, а). Число индуктивных катушек, образующих обмотку, должно быть кратно трем (3, 6, 9, 12 и т. д.).

В зависимости от конструкции обмотки ротора различают силовые асинхронные двигатели с короткозамкнутым и фазным роторами. Ротор представляет собой укрепленный на валу цилиндр, собранный, так же как и сердечник статора, из листов электротехнической стали (рис. 7.5, б). В большинстве случаев ротор снабжается короткозамкнутой обмоткой, состоящей из медных или алюминиевых стержней, уложенных без изоляции в пазы на внешней поверхности магнитопровода ротора. Торцевые концы стержней замыкаются накоротко кольцами из того же материала.

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором наиболее прост, надежен в работе и дешев.

Реже ротор снабжается фазной (катушечной) обмоткой (обычно для двигателей большой мощности), выполняемой изолированным проводом. В этом случае на валу ротора укрепляются три металлических контактных кольца, изолированных от вала (рис. 7.5, в). Обмотка ротора изготавливается трехфазной, изолированным проводом, с тем же числом индуктивных катушек, что и обмотка статора. Фазные обмотки ротора на самом роторе соединяются в «звезду», а их свободные концы подводятся к контактным кольцам. На кольца наложены щетки, установленные в неподвижных щеткодержателях. Через кольца и щетки фазная обмотка замыкается на пусковой реостат.

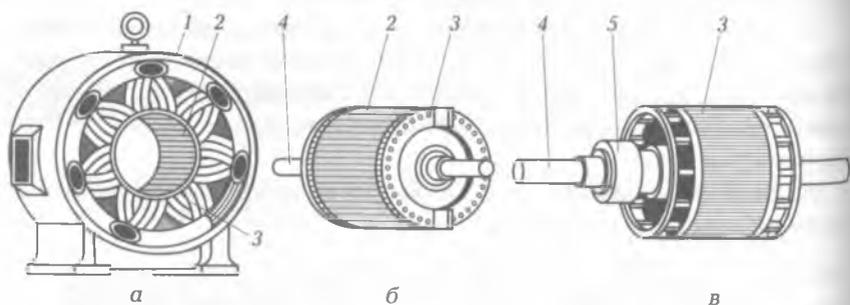


Рис. 7.5. Асинхронный электродвигатель в разобранном виде:

а — статор; б — короткозамкнутый ротор; в — фазный ротор; 1 — станина; 2 — сердечник из штампованных стальных листов; 3 — обмотка; 4 — вал; 5 — контактные кольца

Двигатели с фазным ротором сложнее, дороже и менее надежны в эксплуатации, чем с короткозамкнутым, но обладают лучшими пусковыми и регулировочными свойствами.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Из каких частей состоит асинхронный двигатель?
2. Каковы конструктивные отличия асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором от двигателя с фазным ротором?
3. Какие недостатки имеют асинхронные двигатели с фазным ротором?

### 7.2.3. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И РЕЖИМЫ РАБОТЫ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Принцип действия асинхронного двигателя рассмотрим на модели, представленной на рис. 7.6.

Сердечники статора и ротора образуют магнитную цепь асинхронной машины. Обмотка статора подключается к трехфазной сети, и токи, обтекая обмотку статора, возбуждают магнитное поле машины. Оно замыкается через сталь ротора и таким путем сцепляется с обмоткой ротора. Магнитное поле, возбужденное трехфазной системой токов, вращается в плоскости осей индуктивных катушек статора.

Вращение поля создается поочередным изменением трех образующих его полей фазных обмоток статора, поэтому скорость вращения поля пропорциональна частоте переменного тока  $f$  и определяется по следующей формуле:

$$n_1 = \frac{60f}{p}.$$

Если на статоре размещены три индуктивные катушки, то вращающееся поле, возбуждаемое их токами, делает один оборот в секунду. При стандартной частоте 50 Гц число оборотов такого поля в минуту  $n_1 = f \cdot 60 = 3000$  об/мин. (Чем больше катушек на статоре, тем больше полюсов имеет вращающееся поле и тем медленнее оно вращается).

Вращающееся магнитное поле статора, пересекая обмотку ротора, индуцирует в ее проводниках ЭДС, а так как обмотка ротора

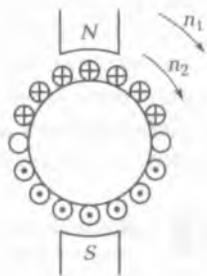


Рис. 7.6. К принципу действия асинхронного двигателя

замкнута, то индуцируемые в ней ЭДС создают в этой обмотке пропорциональные им токи ротора. Последние, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем машины, заставляют ротор вращаться вслед за полем. Ротор двигателя вращается с асинхронной скоростью  $n_2$ , меньшей, чем синхронная скорость вращения поля  $n_1$ . Разность скоростей вращения поля и ротора характеризуется **скольжением**

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%$$

Скольжение асинхронной машины, работающей в режиме двигателя, изменяется от нуля до единицы.

В момент пуска двигателя, когда скорость ротора  $n_2 = 0$ , скольжение  $S = 1$ , или 100 %.

При холостом ходе  $n_2 \approx n_1$ , скольжение  $S \approx 0$ . Скольжение асинхронного двигателя в зависимости от нагрузки меняется незначительно (1—6 %). Чем больше мощность двигателя, тем меньше его скольжение.

**Пример 7.1.** Определить скольжение в процентах для шестиполюсного асинхронного двигателя, если ротор делает 960 об/мин, частота тока  $f = 50$  Гц.

*Решение*

Скорость вращения поля

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/мин.}$$

Тогда скольжение

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100 = \frac{1000 - 960}{1000} = 4\%$$

Скольжение  $S$  характеризует скорость пересечения обмоток ротора вращающимся магнитным полем.

Для изменения направления вращения ротора, т. е. для реверсирования двигателя, необходимо изменить направление вращения магнитного поля, создаваемого обмоткой статора. Это достигается переключением двух фаз, т. е. двух из трех проводов, соединяющих обмотку статора с сетью.



### Запомните

- Если ротор вращается с частотой вращения  $n_2$ , равной частоте вращения магнитного поля ( $n_2 = n_1$ ), т. е. синхронно с полем, то такая частота вращения называется синхронной.

- Если частота вращения ротора не равна частоте вращения магнитного поля ( $n_2 \neq n_1$ ), то такая частота вращения называется асинхронной.
- Асинхронный двигатель развивает вращающий момент только при асинхронной частоте. Частота вращения ротора может мало отличаться от частоты вращения магнитного поля, но принципиально важно, что при работе двигателя она будет всегда меньше ( $n_2 < n_1$ ) частоты вращения поля.
- Для реверсирования двигателя, т. е. для изменения направления вращения ротора, необходимо изменить направление вращения магнитного поля, созданного обмоткой статора. Это можно сделать изменением последовательности фаз обмоток статора. Реверсивные двигатели снабжаются переключателями, с помощью которых можно изменять чередование фаз обмоток статора, а следовательно, и направление вращения ротора.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какая частота вращения ротора называется синхронной, а какая асинхронной?
2. В чем состоит принцип действия асинхронного двигателя?
3. Совпадает ли направление вращения ротора с направлением вращения магнитного поля статора?
4. Какой способ изменения направления вращения ротора вы знаете?
5. Чем различаются асинхронные двигатели в зависимости от типа обмотки ротора?
6. Каковы достоинства и недостатки асинхронных двигателей?

### 7.2.4. ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА ОТ СКОЛЬЖЕНИЯ

Электромагнитный момент возникает при наличии магнитного поля, создаваемого обмоткой статора, и тока в обмотке ротора. Электромагнитный момент определяется соотношением

$$M = C_M \Phi I_2 \cos \psi_2,$$

где  $C_M$  — конструктивный коэффициент асинхронной машины;  $\Phi$  — результирующее магнитное поле в машине;  $\psi_2$  — сдвиг по фазе между ЭДС и током ротора;  $I_2 \cos \psi_2$  — активная составляющая тока ротора.

Для анализа работы асинхронного двигателя также используют следующую формулу зависимости электромагнитного момента  $M$  двигателя от скольжения  $S$ , напряжения, подводимого к обмотке статора,  $U_1$ , активного сопротивления обмотки ротора, связанного с потерями на нагрев обмотки,  $R_2$ , и индуктивного сопротивления обмотки неподвижного ротора, связанного с потоком рассеяния,  $X_2$ :

$$M = C_M \frac{U_1^2 R_2 S}{R_2^2 + (SX_2)^2} \quad (7.1)$$

Из полученного выражения для электромагнитного момента  $M$  следует, что он сильно зависит от подведенного напряжения  $U_1$ .

При снижении, например, напряжения на 10% электромагнитный момент снизится на 19%. Это является одним из недостатков асинхронных двигателей.

Выражение для электромагнитного момента [см. формулу (7.1)] справедливо для любого режима работы и может быть использовано для построения зависимости электромагнитного момента от скольжения при изменении последнего от  $+\infty$  до  $-\infty$  (рис. 7.7).

Двигатель при пуске в ход ( $S = 1$ ) развивает момент  $M_{\text{пуск}}$ . Скольжение, при котором момент достигает наибольшего значения, называют **критическим скольжением**  $S_{\text{кр}}$ , а наибольшее значение момента — **критическим моментом**  $M_{\text{кр}}$ . Отношение критического момента к номинальному называют **перегрузочной способностью двигателя**:

$$\frac{M_{\text{кр}}}{M_n} = \lambda = 2-3.$$

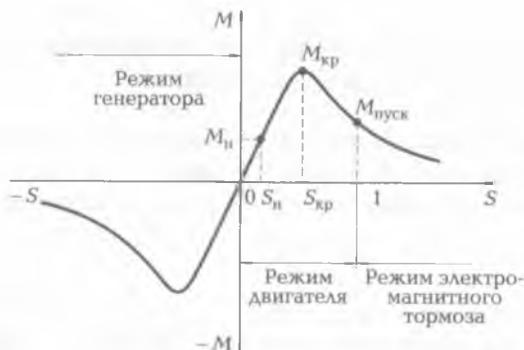


Рис. 7.7. Зависимость электромагнитного момента двигателя от скольжения

Участок характеристики (см. рис. 7.7), на котором скольжение изменяется от 0 до  $S_{кр}$ , соответствует устойчивой работе двигателя.

На этом участке располагается точка номинального режима ( $M_n, S_n$ ). В пределах изменения скольжения от 0 до  $S_{кр}$  изменение нагрузки на валу двигателя будет приводить к изменению частоты вращения ротора, изменению скольжения и вращающего момента. С увеличением момента нагрузки на валу частота вращения ротора станет меньше, что приведет к увеличению скольжения и электромагнитного (вращающего) момента. Если момент нагрузки превысит критический момент, то двигатель остановится.



### Запомните

- Вращающийся момент двигателя пропорционален квадрату напряжения питающей сети.
- Участок характеристики, на котором скольжение изменяется от  $S_{кр}$  до 1, соответствует неустойчивой работе двигателя. Этот участок характеристики двигатель проходит при пуске в ход и торможении.



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. От каких параметров зависит электромагнитный момент  $M$  асинхронного двигателя?
2. При каком моменте скольжение называют критическим скольжением  $S_{кр}$ ?
3. При каком скольжении работа двигателя переходит в режим генератора?
4. Какой участок кривой рис. 7.7 соответствует устойчивой работе двигателя?

## 7.2.5. МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ



**Механическая характеристика** — это зависимость, показывающая, как меняется частота вращения ротора при изменении момента на валу двигателя,  $n_2 = f(M)$  (рис. 7.8).

Участок 1 — 3 соответствует устойчивой, а участок 3 — 4 — неустойчивой работе асинхронного двигателя (используется при пуске или вынужденной остановке двигателя).

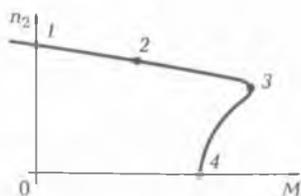


Рис. 7.8. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Точка 1 соответствует идеальному холостому ходу двигателя, когда  $n_1 = n_2$ ; точка 2 — номинальному режиму работы двигателя, ее координаты  $(M_n, n_n)$ ; точка 3 — критическому моменту  $M_{кр}$  и критической частоте вращения  $n_{кр}$ ; точка 4 — пусковому моменту двигателя  $M_{пуск}$ .

Механическую характеристику можно рассчитать и построить по паспортным данным.

Для точки 1  $n_1 = \frac{60f}{p}$ , где  $f$  — частота сети;  $p$  — число пар полюсов двигателя.

Для точки 2 с координатами  $(M_n, n_n)$  номинальная частота вращения  $n_n$  задается в паспорте. Номинальный момент,  $\frac{\text{Вт}}{\text{об/мин}} = \text{Н} \cdot \text{м}$ , рассчитывается по формуле

$$M_n = 9,55 \frac{P_n}{n_n}$$

где  $P_n$  — номинальная мощность (мощность на валу).

Для точки 3 с координатами  $(M_{кр}, n_{кр})$  критический момент определяется по формуле

$$M_{кр} = M_n \lambda.$$

Перегрузочная способность  $\lambda$  задается в паспорте двигателя.

Критическая частота вращения

$$n_{кр} = n_1 (1 - S_{кр}).$$

Критическое скольжение

$$S_{кр} = S_n (\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1}).$$

Номинальное скольжение

$$S_n = \frac{n_1 - n_n}{n_1}.$$

Точка 4 имеет координаты  $(M = M_{пуск}, n_2 = 0)$ . Пусковой момент вычисляют по формуле

$$M_{пуск} = M_n \lambda_{пуск}$$

где  $\lambda_{пуск}$  — кратность пускового момента, задается в паспорте.

Асинхронные двигатели имеют жесткую механическую характеристику, так как частота вращения ротора (участок 1—3) на рис. 7.8 мало зависит от нагрузки на валу. Это одно из достоинств этих двигателей.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какая характеристика асинхронного двигателя называется механической?
2. В каком режиме двигателя частота вращения ротора близка к синхронной?
3. В каком случае можно использовать область неустойчивого режима асинхронного двигателя?



## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Постройте механическую характеристику асинхронного двигателя, используя его паспортные данные.

### 7.2.6. ПУСК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В момент пуска двигателя  $n_2 = 0$ , т. е. скольжение  $S = 1$ . Токи в обмотках ротора и статора зависят от скольжения и возрастают при его увеличении. Пусковой ток двигателя будет в 5—8 раз больше его номинального тока:

$$I_{\text{пуск}} = (5—8)I_{\text{н}}$$

Из-за большой частоты ЭДС ротора асинхронные двигатели имеют ограниченный пусковой момент:

$$M_{\text{пуск}} = (0,8—1,8)M_{\text{н}}$$

Для пуска в ход асинхронного двигателя необходимо, чтобы развиваемый им пусковой момент превышал момент нагрузки на валу. В зависимости от мощности источников питания и условий пуска используют разные способы пуска, которые преследуют цели уменьшения пускового тока и увеличения пускового момента.

Различают следующие способы пуска в ход асинхронных двигателей: прямое включение в цепь, пуск при пониженном напряжении, реостатный пуск, использование двигателей с улучшенными пусковыми свойствами.

**Прямое включение в сеть.** Это самый простой и самый дешевый способ пуска. На двигатель вручную или с помощью дистанционного управления подается номинальное напряжение. Прямое включение в сеть допускается, когда мощность двигателя не превышает 5% мощности трансформатора, если от него питается и осветительная сеть. Ограничение по мощности объясняется бросками тока в момент пуска, что приводит к снижению напряжения на зажимах вторичных обмоток трансформатора. Если от трансформатора не питается осветительная сеть, то прямое включение в сеть можно применять для двигателей, мощность которых не превышает 25% мощности трансформатора.

**Пуск при пониженном напряжении.** Этот способ применяют при пуске в ход мощных двигателей, для которых недопустимо прямое включение в сеть. Для понижения подводимого к обмотке статора напряжения используют дроссели и понижающие автотрансформаторы. После пуска в ход на обмотку статора подается напряжение сети. Понижение напряжения производят в целях уменьшения пускового тока, но одновременно происходит уменьшение пускового момента. Если напряжение при пуске понизить в  $\sqrt{3}$  раз, то пусковой момент понизится в три раза, поэтому этот способ пуска можно применять только при отсутствии нагрузки на валу, т.е. в режиме холостого хода. Если, согласно паспортным данным, двигатель должен включаться в сеть по схеме «треугольник», то для снижения пускового тока на время пуска в ход обмотку статора включают по схеме «звезда».

Основные недостатки этого способа пуска: высокая стоимость пусковой аппаратуры и невозможность пуска с нагрузкой на валу.

**Реостатный пуск.** Этот способ применяют при тяжелых условиях пуска, т.е. при большой нагрузке на валу. Для реостатного пуска используют асинхронные двигатели с фазным ротором, в цепь ротора включается пусковой реостат. Реостатный пуск служит для увеличения пускового момента. Одновременно происходит уменьшение пускового тока двигателя. По мере разгона двигателя пусковой реостат выводится и после окончания пуска обмотка ротора оказывается замкнутой накоротко.

Схема реостатного пуска и механические характеристики при этом пуске представлены на рис. 7.9.

В момент пуска в ход (см. рис. 7.9, а) в цепь ротора введен полностью пусковой реостат ( $R_{\text{пуск3}} = R_{\text{пуск1}} + R_{\text{пуск2}}$ ), для чего контакты реле  $K_1$  и  $K_2$  разомкнуты. При этом двигатель будет запускаться по характеристике 3 (см. рис. 7.9, б) под действием пускового момента  $M_{\text{пуск}}$ .

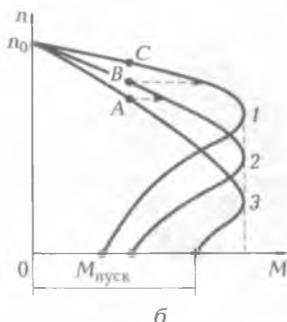
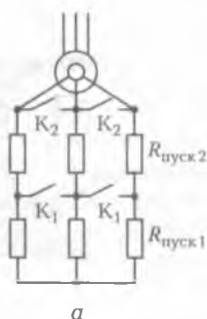


Рис. 7.9. Асинхронный двигатель:

*а* — схема реостатного пуска; *б* — механические характеристики двигателя при реостатном пуске

При заданной нагрузке на валу и введенном реостате  $R_{\text{пуск}3}$  разгон закончится в точке *A*. Для дальнейшего разгона двигателя нужно замкнуть контакты  $K_1$ , при этом сопротивление пускового реостата снизится до  $R_{\text{пуск}2}$  и разгон будет продолжаться по характеристике 2 до точки *B*. При замыкании контактов  $K_2$  пусковой реостат будет полностью выведен ( $R_{\text{пуск}} = 0$ ) и окончательный разгон двигателя будет продолжаться по его естественной механической характеристике 1 и закончится в точке *C*.

**Использование двигателей с улучшенными пусковыми свойствами.** Стремление совместить достоинства асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (высокая надежность) и фазным ротором (большой пусковой момент) привело к созданию двигателей с улучшенными пусковыми свойствами. Они имеют короткозамкнутую обмотку ротора специальной конструкции. Различают двигатели с обмоткой ротора в виде двойной «беличьей клетки» (рис. 7.10, *а*) и с глубоким пазом (рис. 7.10, *б*).

У двигателя с **двойной «беличьей клеткой»** (см. рис. 7.10, *а*) на роторе закладывают две короткозамкнутые обмотки. Обмотка 1 играет роль пусковой, а обмотка 2 является рабочей. Для получения повышенного пускового момента пусковая обмотка должна обладать большим активным сопротивлением, чем рабочая обмотка, поэтому обмотка 1 выполняется из материала с повышенным удельным сопротивлением (латунь), чем обмотка 2 (медь). Сечение проводников, образующих пусковую обмотку, меньше, чем у рабочей обмотки. За счет этого повышается активное сопротивление пусковой обмотки.

Рабочая обмотка, расположенная глубже, охватывается большим магнитным потоком, чем пусковая, поэтому индуктивное сопротив-

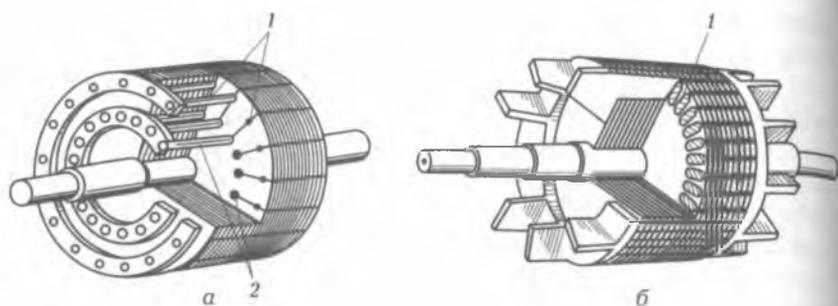


Рис. 7.10. Конструкции ротора двигателей с улучшенными пусковыми свойствами:

а — с двойной «беличьей клеткой»; б — с глубоким пазом; 1 — пусковая обмотка; 2 — рабочая обмотка

ление рабочей обмотки значительно больше, чем пусковой. За счет этого в момент пуска в ход, когда частота тока ротора имеет наибольшее значение, ток в рабочей обмотке, как следует из закона Ома, будет небольшим и в создании пускового момента будет участвовать в основном пусковая обмотка, имеющая большое активное сопротивление. По мере разгона двигателя частота тока ротора падает, уменьшается и индуктивное сопротивление обмоток ротора, что приводит к увеличению тока в рабочей обмотке. За счет этого в создании вращающего момента будет участвовать в основном рабочая обмотка. Она обладает малым активным сопротивлением, поэтому естественная механическая характеристика двигателя будет жесткой.

Аналогичная картина наблюдается у двигателя с **глубоким пазом** (см. рис. 7.10, б). Глубокий стержень обмотки 1 можно представить в виде нескольких проводников, расположенных по высоте паза. За счет высокой частоты тока в обмотке ротора в момент пуска в ход происходит «вытеснение тока к поверхности проводника». За счет этого в создании пускового момента участвует только верхний слой проводников обмотки ротора. Сечение верхнего слоя значительно меньше сечения всего проводника, поэтому при пуске в ход обмотка ротора обладает повышенным активным сопротивлением, двигатель развивает повышенный пусковой момент. По мере разгона двигателя плотность тока по сечению проводников обмотки ротора выравнивается, сопротивление обмотки ротора снижается.

В целом эти двигатели имеют жесткие механические характеристики, повышенный пусковой момент и меньшую кратность пускового тока, чем двигатели с короткозамкнутым ротором обычной конструкции.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие способы пуска в ход асинхронного двигателя вы знаете?
2. Какой способ пуска в ход асинхронного двигателя является самым дешевым?
3. Каковы недостатки способа пуска в ход асинхронного двигателя при пониженном напряжении?
4. В чем состоят преимущества конструкции ротора двигателей с улучшенными пусковыми свойствами?

### 7.2.7. ТОРМОЗНЫЕ РЕЖИМЫ АСИНХРОННЫХ МАШИН

При работе многих производственных механизмов возникает необходимость в быстрой остановке (торможении) двигателя. Для этой цели широко используются механические тормоза, но асинхронная машина может сама выполнять функции тормозного устройства, работая в одном из тормозных режимов. При этом механические тормоза используются как запасные или аварийные, а также для удержания механизма в неподвижном состоянии.

Различают три тормозных режима асинхронных машин:

- 1) генераторное торможение;
- 2) динамическое торможение;
- 3) торможение противовключением.

**Генераторное торможение.** Машина переходит в режим генератора, если ротор начнет вращаться быстрее магнитного поля. Этот режим может наступить при регулировании скорости вращения увеличением числа пар полюсов или уменьшением частоты источника питания, а также в подъемно-транспортных машинах при опускании груза, когда под действием силы тяжести груза ротор начинает вращаться быстрее магнитного поля.

В режиме генератора изменяется направление электромагнитного момента, т. е. он становится тормозным, под действием чего происходит быстрое снижение скорости вращения. Одновременно изменяется фаза тока в обмотке статора, что приводит к изменению направления передачи электрической энергии. В режиме генератора происходит возврат энергии в сеть.

Одно из достоинств генераторного торможения у асинхронных машин заключается в том, что переход в режим генератора происходит автоматически, как только ротор начинает вращаться быстрее магнитного поля. Это защищает асинхронные двигатели от аварийной ситуации, которая может наступить у двигателей по-

стоянного тока. Асинхронные двигатели не могут пойти в разнос. Максимальная частота вращения ротора ограничивается частотой вращения магнитного поля.

Генераторное торможение является самым экономичным режимом, так как происходит преобразование механической энергии в электрическую и возврат энергии в сеть.

Одно из достоинств этого тормозного режима состоит в его самопроизвольном появлении, т. е. не требуется никакая контролирующая аппаратура.

**Динамическое торможение.** Этот тормозной режим используется для точной остановки мощных двигателей. На время торможения обмотка статора отключается от сети переменного напряжения и подключается к источнику с постоянным напряжением. При этом обмотка статора будет создавать постоянное неподвижное магнитное поле. При вращении ротора относительно этого магнитного поля изменяется направление ЭДС и тока ротора, что приведет к изменению направления электромагнитного момента, т. е. он станет тормозным. Под действием этого момента происходит торможение. Изменяя величину подведенного к обмотке статора напряжения, можно регулировать время торможения.

Основным достоинством этого тормозного режима является точная остановка. Постоянное напряжение можно подводить к обмотке статора только на время торможения. После остановки двигателя нужно отключить от сети постоянного тока.

Основные недостатки динамического торможения: необходимость источника постоянного тока и неэкономичность.

**Торможение противовключением.** Этот тормозной режим возникает при реверсе двигателя, а также широко используется для быстрой остановки двигателя.

Для торможения двигателя нужно изменить порядок чередования фаз, т. е. переключить две фазы.

Достоинством этого тормозного режима является быстрое торможение, так как тормозной момент действует на всем тормозном пути.

Недостатки: большие токи и потери в обмотках при торможении, необходима аппаратура, контролирующая скорость вращения и отключающая двигатель от сети при его остановке. Если в приводе механизма двигатель часто работает в режиме реверса, приходится завышать его мощность из-за больших потерь мощности.

1. Каковы тормозные режимы асинхронных машин?
2. Какой из тормозных режимов асинхронных машин является самым экономичным?
3. В чем состоят недостатки режима торможения противовключением?

### 7.2.8. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Число оборотов ротора в минуту определяется следующим выражением:

$$n_2 = n_1(S - 1) = \frac{60f_1(1 - S)}{p}$$

Из выражения видно, число оборотов ротора асинхронного двигателя можно регулировать изменением любой из трех величин:  $f_1$ ,  $p$ ,  $S$ .

Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя с помощью изменения частоты тока сети возможно на базе полупроводниковой техники. При таком регулировании частота вращения изменяется плавно.

Изменение числа полюсов электрической машины возможно, если на статоре выполнено несколько (обычно две) обмоток с различным числом полюсов или одна обмотка, допускающая переключения на различное число полюсов. При изменении числа полюсов обмотки статора изменится скорость вращения его магнитного поля, а следовательно, и частота вращения ротора двигателя. Этот способ регулирования является достаточно экономичным, но недостаток его состоит в ступенчатом изменении частоты вращения двигателя. Кроме того, стоимость такого двигателя возрастает вследствие усложнения обмотки статора и увеличения габаритных размеров машины.

Регулирование частоты вращения этим способом применяется в двигателях с короткозамкнутым ротором.

Изменение скольжения можно получить путем введения в цепь обмотки ротора регулирующего реостата. Регулирующий реостат включается в цепь обмотки фазного ротора подобно пусковому, но в отличие от пускового этот реостат рассчитывается на длительную нагрузку током. Этот способ регулирования частоты вращения асинхронных двигателей имеет ряд существенных недостатков: дополнительные потери в реостате, малый диапазон регулирования.

Асинхронные двигатели являются наиболее распространенными среди электрических двигателей и выпускаются со стандартными

зованными номинальными значениями синхронных частот вращения для промышленной частоты сети 50 Гц: 3 000; 1 500; 1 000; 750; 375; 300; 250; 187,5; 166,6; 150; 125; 100 об/мин.

Номинальные рабочие частоты асинхронных двигателей несколько меньше синхронных из-за наличия скольжения.

## ? КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие способы регулирования частоты вращения асинхронного двигателя вам известны?
2. В чем состоят недостатки способа регулирования частоты вращения с помощью регулирующего реостата?
3. Можно ли менять число полюсов асинхронной машины и если можно, то к чему это приведет?
4. В каком типе асинхронных двигателей используется способ регулирования частот путем изменения числа полюсов?

### 7.2.9. КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Коэффициент мощности асинхронного двигателя определяется соотношением

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}},$$

где  $P_1$ ,  $Q_1$ ,  $S_1$  — активная, реактивная и полная мощность двигателя соответственно.

Активная мощность двигателя  $P_1$  складывается из мощности на валу  $P_2$  (полезной мощности) и мощности потерь  $\Delta P$ :

$$P_1 = P_2 + \Delta P.$$

Потери складываются из электрических потерь (потери на нагрев обмоток)  $\Delta P_{эл}$ ; потерь в стали (потери на нагрев сердечника)  $\Delta P_{ст}$  и механических потерь  $\Delta P_{мех}$ :

$$\Delta P = \Delta P_{эл} + \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех}.$$

Электрические потери  $\Delta P_{эл}$  зависят от токов в обмотках и возрастают при увеличении нагрузки на валу. Потери в стали не зависят от нагрузки на валу, а зависят от подведенного к обмотке статора напряжения. Механические потери относятся к постоянным потерям.

В номинальном режиме  $\cos \varphi_n = 0,85—0,9$ , в режиме холостого хода  $\cos \varphi_x = 0,1—0,2$ .

Снижение  $\cos \varphi_x$  объясняется тем, что активная мощность мала ( $P_{1x} = \Delta P_{эл} + \Delta P_{ст} + \Delta P_{мех}$ ), а реактивная мощность  $Q_1$  остается такой же, как и в номинальном режиме.

Зависимость коэффициента мощности асинхронного двигателя от нагрузки на валу показана на рис. 7.11.

При большой недогрузке асинхронного двигателя он имеет низкий коэффициент мощности, что экономически невыгодно.

Для повышения  $\cos \varphi$  при малой нагрузке рекомендуется понижать подведенное к двигателю напряжение. При этом уменьшается реактивная мощность, а коэффициент мощности повышается.

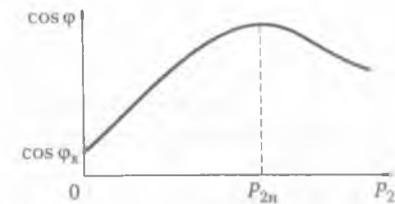


Рис. 7.11. Зависимость коэффициента мощности от мощности на валу

## ? КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каким соотношением определяется коэффициент мощности асинхронного двигателя?
2. Какие меры нужно предпринять, чтобы повысить коэффициент мощности асинхронного двигателя при малой нагрузке?
3. Из каких параметров складывается активная мощность двигателя?

## T ТЕМЫ ДОКЛАДОВ И РЕФЕРАТОВ

1. Применение асинхронных двигателей в промышленности.
2. Электродвигатели малой мощности (микродвигатели).
3. Асинхронные тахогенераторы и применение их в промышленности.
4. Линейные асинхронные двигатели.

## 7.3. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

### 7.3.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН

В синхронных машинах частота вращения ротора равна частоте вращения магнитного поля статора и, следовательно, определяется частотой тока сети  $f$  и числом пар полюсов  $p$ :

$$n = \frac{60f}{p}$$

Как и всякая электрическая машина, синхронная машина является **обратимой**, т. е. может работать в режиме как генератора, так и двигателя.

В 1876 г. русский ученый П. Н. Яблочков разработал несколько образцов многофазных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением и электрически несвязанными фазами, предназначенных для питания созданных им дуговых электрических ламп (свечи Яблочкова). Первый трехфазный синхронный генератор изобрел известный русский электротехник М. О. Доливо-Добровольский. Этот генератор имел мощность 230 кВ · А, приводился во вращение от гидротурбины и обеспечивал электроснабжение международной электротехнической выставки во Франкфурте в 1891 г. по четырехпроводной электрической линии трехфазного тока.

Основная электромагнитная схема синхронных машин с тех пор оставалась неизменной, но усовершенствовались их конструктивное выполнение и возросли электромагнитные нагрузки, что позволило значительно улучшить массогабаритные и энергетические показатели и нагрузочную способность синхронных машин. Внешний вид синхронного генератора представлен на рис. 7.12.

Синхронные машины используют главным образом в качестве источников электрической энергии переменного тока; их устанавливают на мощных тепловых, гидравлических и атомных электростанциях, а также на передвижных электростанциях и транспортных установках (тепловозах, автомобилях, самолетах). Конструкция синхронного генератора определяется в основном типом привода.



Рис. 7.12. Внешний вид синхронного генератора

В зависимости от этого различают турбогенераторы, гидрогенераторы и дизель-генераторы. Турбогенераторы приводятся во вращение паровыми или газовыми турбинами, гидрогенераторы — гидротурбинами, дизель-генераторы — двигателями внутреннего сгорания.

Синхронные машины широко используют также в качестве электродвигателей при мощности 100 кВт и более для привода насосов, компрессоров, вентиляторов и других механизмов, работающих при постоянной частоте вращения. Для генерирования или потребления реактивной мощности в целях улучшения коэффициента мощности сети и регулирования ее напряжения применяют синхронные компенсаторы.

В электробытовых приборах (магнитофонах, проигрывателях, киноаппаратуре) и системах управления широкое применение получили различные синхронные микромашины — с постоянными магнитами, индукторные, реактивные, гистерезисные, шаговые.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какая электрическая машина называется синхронной?
2. Что понимают под обратимостью синхронной машины?
3. Какова область применения синхронных генераторов?

### 7.3.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО СИНХРОННЫХ МАШИН

Как и все электрические машины, синхронные имеют статор и ротор. Ротор синхронной машины представляет собой электромагнит, возбуждаемый постоянным током. В синхронных машинах малой мощности вместо обмотки на роторе могут использоваться постоянные магниты.

Статор 1 синхронной машины (рис. 7.13, а) выполнен так же, как и асинхронной: на нем расположена трехфазная (в общем случае многофазная) обмотка 3. Обмотку ротора 4, питаемую от источника постоянного тока, называют **обмоткой возбуждения**, так как она создает в машине магнитный поток возбуждения. Вращающуюся обмотку ротора соединяют с внешним источником постоянного тока посредством контактных колец 6 и щеток 5 (рис. 7.13, б). При вращении ротора 2 с некоторой частотой  $n_2$  поток возбуждения пересекает проводники обмотки статора и индуцирует в ее фазах переменную ЭДС  $E$ , изменяющуюся с частотой

$$f_1 = \frac{pn_2}{60}, \quad (7.2)$$

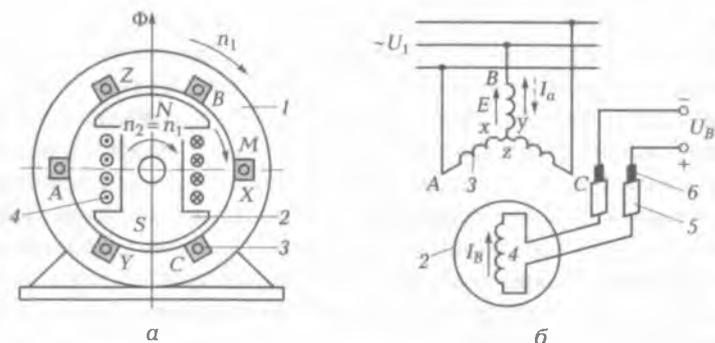


Рис. 7.13. Синхронная машина:

а — электромагнитная схема; б — схема включения; 1 — статор; 2 — ротор; 3 — трехфазная обмотка; 4 — обмотка ротора; 5 — щетки; 6 — контактные кольца

Если обмотку статора подключить к какой-либо нагрузке, то проходящий по этой обмотке многофазный ток  $I_a$  создает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (7.3)$$

Из формул (7.2) и (7.3) следует, что  $n_1 = n_2$ , т. е. ротор вращается с той же частотой, что и магнитное поле статора. Такую машину называют **синхронной**.

Результирующий магнитный поток  $\Phi$  синхронной машины создается совместным действием МДС обмотки возбуждения и обмотки статора, и результирующее магнитное поле вращается в пространстве с той же частотой, что и ротор.

В синхронной машине обмотку, в которой индуцируется ЭДС и проходит ток нагрузки, называют **обмоткой якоря**, а часть машины, на которой расположена обмотка возбуждения, — **индуктором**. Следовательно, в приведенной машине (см. рис. 7.13) статор является якорем, а ротор — индуктором. Для принципа действия и теории работы машины не имеет значения — вращается якорь или индуктор, поэтому в некоторых случаях применяют синхронные машины с обращенной конструктивной схемой: обмотку якоря, к которой подключают нагрузку, располагают на роторе, а обмотку возбуждения, питаемую постоянным током, — на статоре. Такую машину называют **обращенной**. Обращенные машины имеют сравнительно небольшую мощность, так как у них затруднен отбор мощности от обмотки ротора.

## Запомните

Для установившихся режимов работы синхронной машины характерны следующие особенности:

- ротор машины, работающей как в двигательном, так и в генераторном режимах, вращается с постоянной частотой, равной частоте вращающегося магнитного поля, т.е.  $n_2 = n_1$ , поэтому машина называется синхронной;
- частота изменения ЭДС, индуцируемой в обмотке якоря, пропорциональна частоте вращения ротора;
- в установившемся режиме ЭДС в обмотке возбуждения не индуцируется; МДС этой обмотки определяется только током возбуждения и не зависит от режима работы машины.

**Пример 7.2.** Для получения ЭДС с частотой 50 Гц двух полюсный генератор должен сделать 3 000 об/мин ( $f = \frac{p n_2}{60} = \frac{1 \cdot 3\,000}{60} = 50$  Гц).

По устройству ротора различают два типа синхронной машины: машина с явнополюсным ротором, в которой индуктивные катушки обмотки постоянного магнита размещены на выступающих полюсах (рис. 7.14, а), и машина с неявнополюсным ротором, в котором распределенная обмотка постоянного тока уложена в пазы ротора (рис. 7.14, б).

Двух- и четырехполюсные машины большой мощности, работающие при частоте вращения ротора 1 500 и 3 000 об/мин, изготавливают, как правило, с неявнополюсным ротором. Применение в них явнополюсного ротора невозможно по условиям обеспечения необходимой механической прочности крепления полюсов и обмотки возбуждения. Обмотку возбуждения в такой машине размещают в пазах сердечника ротора, выполненного из массивной стальной

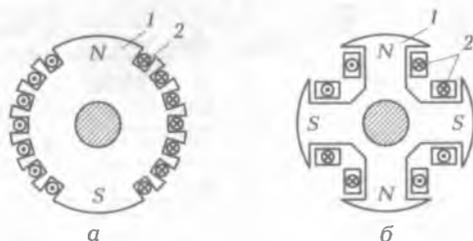


Рис. 7.14. Ротор синхронной машины:

а — явнополюсный; б — неявнополюсный; 1 — сердечник ротора; 2 — обмотка возбуждения

поковки, и укрепляют немагнитными клиньями. Лобовые части обмотки, на которые воздействуют значительные центробежные силы, крепят с помощью стальных массивных бандажей.

Явнополюсная синхронная машина изготавливается для скорости вращения до 1500 об/мин и используется в качестве генератора или двигателя. Наиболее крупные синхронные машины устанавливаются на гидроэлектростанциях и приводятся во вращение гидравлическими турбинами, частота вращения которых составляет 50—500 об/мин. Машины этого типа могут быть использованы и в качестве дизель-генераторов, которые приводятся во вращение двигателями внутреннего сгорания, с частотой вращения от 100 до 1500 об/мин.

Устройство явнополюсной машины представлено на рис. 7.15.

**Турбогенераторы** приводятся во вращение быстроходными паровыми или газовыми турбинами и конструктивно выполняются неявнополюсными. Вал в них расположен горизонтально. Диаметр ротора по условиям механической прочности ограничен размерами 1—1,5 м. Предельная длина ротора 7,5—8,5 м; она ограничена допустимым прогибом вала. Мощность турбогенераторов составляет 800—1200 МВт.

**Гидрогенераторы** приводятся во вращение гидравлическими турбинами, частота вращения которых составляет 50—500 об/мин. Генераторы выполняют с большим числом полюсов и явнополюс-

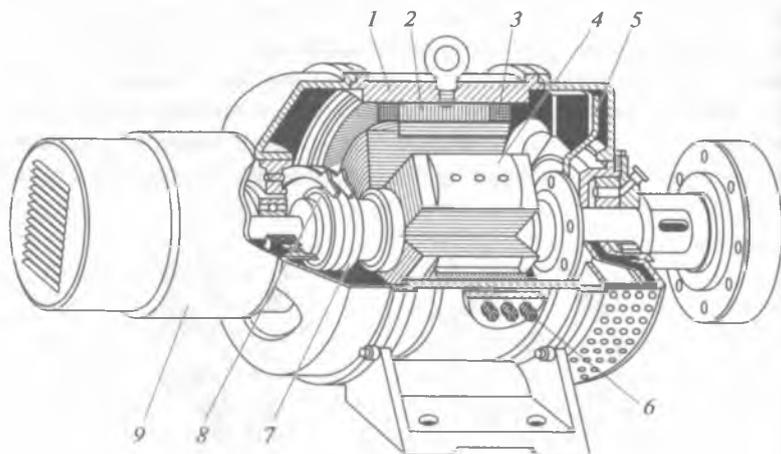


Рис. 7.15. Устройство явнополюсной машины:

1 — корпус; 2 — сердечник статора; 3 — обмотка статора; 4 — ротор; 5 — вентилятор; 6 — выводы обмоток; 7 — контактные кольца; 8 — щетки; 9 — возбудитель

ными роторами. В гидрогенераторах мощностью более 500 МВт диаметр ротора превышает 15 м при длине ротора около 2 м.

**Дизель-генераторы** приводятся во вращение двигателями внутреннего сгорания. Их изготавливают явнополюсными с горизонтальным расположением вала. Мощность таких генераторов бывает от нескольких киловольт-ампер до нескольких мегавольт-ампер при частотах вращения от 100 до 1 500 об/мин.

Неявнополюсная синхронная машина используется в основном как генератор на тепловых электростанциях и приводится во вращение паровой турбиной со скоростью вращения 3 000 об/мин (при частоте 50 Гц).



### Запомните

- Ротор синхронной машины может быть явно- и неявнополюсным.
- Синхронные генераторы применяются в качестве основных устройств, производящих электрическую энергию на электростанциях, и разделяются на турбо-, гидро- и дизель-генераторы.



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоит принципиальное отличие синхронных машин от асинхронных?
2. Остается ли принцип обратимости в синхронных машинах?
3. Какова суть принципа работы синхронного генератора?
4. Как устроены явнополюсная и неявнополюсная синхронные машины?
5. От каких параметров зависит частота вращения ротора синхронной машины?

### 7.3.3. ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Эксплуатационные свойства синхронного генератора в значительной степени определяются его внешней и регулировочной характеристиками.

Если синхронный генератор не нагружен (работает вхолостую), то тока в обмотках статора нет и напряжение  $U$  на зажимах генератора равно ЭДС  $E_0$ , созданной в обмотке статора.

Напряжение  $U$  на зажимах генератора, работающего под нагрузкой, существенно отличается от ЭДС  $E_0$  при холостом ходе. Это

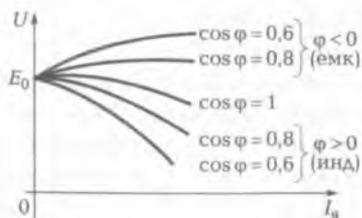


Рис. 7.16. Внешние характеристики синхронного генератора при различных нагрузках

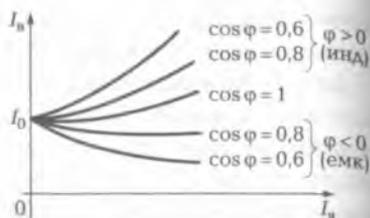


Рис. 7.17. Регулировочная характеристика синхронного генератора при различных нагрузках

отличие тем больше, чем больше реактивное сопротивление нагрузки.

**Внешние характеристики**  $U = f(I_n)$  синхронного генератора, показывающие изменения напряжения на зажимах генератора при изменении тока для активной и реактивной нагрузок, изображены на рис. 7.16.

На практике нагрузка генератора в большинстве случаев является активно-индуктивной.

Падение напряжения на активно-индуктивной нагрузке обусловлено размагничивающим действием реакции якоря и в незначительной степени падением напряжения на внутреннем индуктивном сопротивлении машины.

Подъем характеристик при емкостной нагрузке обусловлен подмагничивающим действием реакции якоря.

Зависимости тока возбуждения  $I_b$  от тока нагрузки  $I_n$  при неизменном напряжении  $U$ , угле  $\varphi$  и частоте  $f_1$  называют **регулируемыми характеристиками** (рис. 7.17). Они показывают, как надо изменять ток возбуждения генератора, чтобы поддерживать его напряжение неизменным при изменении тока нагрузки. Очевидно, что с возрастанием нагрузки при  $\varphi > 0$  необходимо увеличивать ток возбуждения, а при  $\varphi < 0$  — уменьшать его. Чем больше угол  $\varphi$  по абсолютной величине, тем в большей степени требуется изменять ток возбуждения.



### Запомните

- Реакция якоря при индуктивной нагрузке будет размагничивающая, т. е. результирующее поле машины ослабляется.
- Реакция якоря при емкостной нагрузке — подмагничивающая, т. е. результирующее поле усиливается.

1. Какими характеристиками определяются эксплуатационные свойства синхронного генератора?
2. Чем обусловлен подъем внешней характеристики синхронного генератора?
3. Что называют регулировочной характеристикой синхронного генератора?

### 7.3.4. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Синхронные генераторы в качестве источников электроэнергии переменного тока включаются параллельно в распределительную сеть. Необходимым условием включения генератора на параллельную работу с сетью является его синхронизация, т. е. достижение совпадения чередования фаз, частот, начальных фаз и значений напряжений сети и генератора. Момент совпадения фаз сети и генератора контролируют синхроноскопами. Для включения генераторов на параллельную работу используют автоматическую синхронизацию, которая позволяет регулировать напряжения и частоты так, как это необходимо. Применяется также метод самосинхронизации, сущность которого заключается в том, что генератор включают в сеть невозбужденным при частоте вращения ротора, близкой к синхронной, а затем включают ток возбуждения и ротор генератора втягивается в синхронизм.

**Пример 7.3.** Определить напряжение на зажимах синхронного трехфазного генератора, работающего в режиме холостого хода, при соединении обмоток «треугольником» и «звездой», если частота  $f = 50$  Гц, количество витков, размещенных в пазах статора,  $w = 180$ , обмоточный коэффициент  $k_{об} = 0,9$ , амплитудное значение магнитного потока одной фазы  $\Phi_m = 0,01$  Вб.

*Решение*

Число витков одной фазы обмотки статора

$$w_1 = \frac{w}{3} = \frac{180}{3} = 60.$$

Вращающийся магнитный поток

$$\Phi = 1,5\Phi_m = 1,5 \cdot 0,01 = 0,015 \text{ Вб.}$$

Электродвижущая сила, индуцируемая в каждой фазе,

$$E_\phi = 4,44fk_{об}w_1\Phi = 4,44 \cdot 50 \cdot 0,9 \cdot 60 \cdot 0,015 = 179,8 \text{ В} \approx 180 \text{ В.}$$

При холостом ходе генератора и соединении его обмоток «треугольником» напряжение на зажимах равно ЭДС:

$$U_{\Delta} = E_{\Phi} = 180 \text{ В.}$$

При соединении обмоток «звездой» напряжение на зажимах

$$U = \sqrt{3} E_{\Phi} = \sqrt{3} \cdot 180 = 311,4 \text{ В.}$$

## **?** КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой вид нагрузки синхронного генератора наиболее часто встречается на практике?
2. Каким образом достигаются необходимые условия синхронизации перед включением синхронного генератора в сеть?
3. В чем заключается сущность метода самосинхронизации генератора?

## **П** ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Определите число пар полюсов синхронного турбогенератора, вырабатывающего энергию переменного тока с частотой  $f = 50$  Гц, если частота вращения ротора составляет 3000 об/мин.
2. Найдите частоту вращения четырехполюсного вращающегося магнитного поля, если частота питающего тока составляет 400 Гц.
3. Определите частоту переменного тока двухполюсного синхронного дизель-генератора, если частота вращения ротора составляет 1800 об/мин.
4. Вычислите значение ЭДС, индуцируемой в каждой фазе обмотки статора трехфазного синхронного генератора, с числом витков, размещенных в пазах статора,  $w = 270$ , обмоточным коэффициентом  $k_{об} = 0,9$  и частотой тока  $f = 50$  Гц.

## **Т** ТЕМЫ ДОКЛАДОВ И РЕФЕРАТОВ

1. Устройство и принцип действия синхронных машин.
2. Характеристики синхронного генератора.
3. Параллельная работа синхронного генератора с сетью.

### 7.3.5. СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО

Синхронный двигатель не имеет принципиальных конструктивных отличий от синхронного генератора. Трехфазную статорную обмотку (якорь) двигателя подключают к сети трехфазного пере-

менного тока и создают вращающееся магнитное поле, число оборотов которого

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

На роторе двигателя помещается обмотка возбуждения, подключаемая к источнику постоянного тока (обычно регулируемому выпрямителю). Ток возбуждения создает магнитный поток полюсов. Вращающееся магнитное поле, возбуждаемое токами обмотки статора, увлекает за собой полюсы ротора. При этом ротор вращается только с синхронной частотой, т. е. с частотой, равной частоте вращения поля статора. Таким образом, частота вращения синхронного двигателя строго постоянна, если неизменна частота тока питающей сети.

Синхронные двигатели производят преимущественно с явно выраженными полюсами, и работают они в нормальном режиме с перевозбуждением при опережающем  $\cos \varphi = 0,8$ .

Синхронные двигатели имеют следующие **преимущества**:

- возможность работы при  $\cos \varphi = 1$ ; это приводит к улучшению  $\cos \varphi$  сети, а также к сокращению размеров двигателя, так как его ток меньше тока асинхронного двигателя той же мощности. При работе с опережающим током синхронные двигатели служат генераторами реактивной мощности, поступающей в асинхронные двигатели, что снижает потребление этой мощности от генераторов электростанций;
- меньшая чувствительность к колебаниям напряжения, так как их максимальный момент пропорционален напряжению в первой степени (а не квадрату напряжения);
- строгое постоянство частоты вращения независимо от механической нагрузки на валу.

**Недостатками** синхронных двигателей являются:

- сложность конструкции;
- сравнительная сложность пуска в ход;
- трудности с регулированием частоты вращения, которое возможно только путем изменения частоты питающего напряжения.

Указанные недостатки синхронных двигателей делают их менее выгодными, чем асинхронные двигатели, при ограниченных мощностях до 100 кВт. Однако при более высоких мощностях, когда особенно важно иметь высокий  $\cos \varphi$  и уменьшенные габаритные размеры машины, синхронные двигатели предпочтительнее асинхронных.

### **!** Запомните

- Частота вращения ротора синхронного двигателя равна частоте вращения магнитного поля статора и не зависит от нагрузки; синхронный двигатель имеет абсолютно жесткую механическую характеристику.
- Несмотря на наличие дополнительного источника постоянного тока для возбуждения синхронные двигатели нередко используются в промышленности, так как позволяют регулировать  $\cos \varphi$  потребителя и тем самым снизить потери при передаче электроэнергии.

### **?** КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как устроен и работает синхронный двигатель?
2. В чем состоят преимущества и недостатки синхронного двигателя в сравнении с асинхронным двигателем?
3. Какова область применения синхронных двигателей?

## 7.3.6. ПУСК СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Пуск в ход синхронного двигателя непосредственным включением в сеть невозможен, так как ротор из-за своей значительной инерции не может быть сразу увлечен вращающимся полем статора, скорость которого устанавливается мгновенно. На ротор, если он возбужден, действует знакопеременный момент, среднее значение которого за период равно нулю. Электромагнитный момент возникает и может заставить ротор вращаться только в том случае, когда полюсы поля статора будут медленно перемещаться относительно полюсов возбуждения ротора.

### **!** Запомните

Для пуска в ход двигателя необходимо предварительно увеличить число оборотов ротора до синхронной скорости или близкой к ней.

Для разгона синхронных двигателей применяют **асинхронный пуск**. Для этого в полюсных наконечниках ротора синхронного двигателя укладывается пусковая обмотка, выполненная в виде беличьего колеса подобно короткозамкнутой обмотке ротора асинхронного двигателя. После разгона ротора двигателя до частоты

вращения, близкой к синхронной, составляющей примерно  $0,95\omega_1$ , в обмотку возбуждения подается постоянный ток и ротор втягивается в синхронизм.

Отключаемую от источника питания обмотку возбуждения замыкают на активное сопротивление. Если же обмотку оставить разомкнутой, то вращающийся магнитный поток статора индуцирует в ней ЭДС в 20 — 30 раз больше номинального напряжения возбуждения и это может привести к пробое изоляции обмотки ротора.

Синхронные двигатели обычно пускаются прямым включением в сеть статорной обмотки, и только мощные двигатели требуют ограничения пускового тока.



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему невозможен пуск в ход синхронного двигателя непосредственным включением в сеть?
2. В чем состоит суть принципа асинхронного пуска?
3. Синхронные двигатели какой мощности требуют ограничения пускового тока?

### 7.3.7. ПОТЕРИ И КПД СИНХРОННЫХ МАШИН

В синхронных машинах имеют место электрические потери в роторе и статоре, магнитные потери в сердечнике статора, механические потери на вентиляцию и трение вращающихся частей.

Коэффициент полезного действия трехфазного синхронного генератора определяется по формуле

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum P}$$

Коэффициент полезного действия трехфазного синхронного двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2 - \sum P}{P_1}$$

Сумма потерь

$$\sum P = P_M + P_{ст} + P_{мех} + P_B + P_{\Delta}$$

где  $P_M$  — потери в меди обмоток статора,  $P_M = 3I^2R$ ;  $P_{ст}$  — потери в стали статора;  $P_{мех}$  — механические потери (потери на трение);  $P_B$  — потери на возбуждение;  $P_{\Delta}$  — добавочные потери.

Коэффициент полезного действия мощных синхронных генераторов достаточно высок и достигает 0,98; КПД синхронных двигателей тем выше, чем больше мощность двигателя, и составляет 0,91 — 0,96.

**Пример 7.4.** Трехфазный синхронный двигатель с номинальной мощностью  $P_n = 600$  кВт и номинальным напряжением  $U_n = 400$  В имеет следующие данные: частота  $f = 50$  Гц, количество полюсов  $2p = 4$ , КПД  $\eta_n = 0,96$ , коэффициент мощности  $\cos \varphi_n = 0,8$  (при токе, опережающем по фазе напряжение). Определить частоту вращения ротора, номинальный вращающий момент, активную и реактивную мощности, потребляемые из сети, ток статора и его реактивную составляющую.

*Решение*

Частота вращения ротора

$$n_2 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/мин.}$$

Номинальный вращающий момент

$$M_n = 9,55 \frac{P_n}{n_2} = 9,55 \frac{600000}{1500} = 3820 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Активная мощность

$$P_1 = \frac{P_n}{\eta_n} = \frac{600}{0,96} = 625 \text{ кВт.}$$

Полная мощность

$$S_1 = \frac{P_1}{\cos \varphi_n} = \frac{625}{0,8} = 781,25 \text{ кВт.}$$

Реактивная мощность:

$$Q = \sqrt{S_1^2 - P_1^2} = \sqrt{781,25^2 - 625^2} = 468,75 \text{ квар.}$$

Ток статора

$$I_n = \frac{S_1}{\sqrt{3}U_n} = \frac{781,25}{\sqrt{3} \cdot 400} = 1,148 \approx 1,15 \text{ А.}$$

Реактивная (емкостная) составляющая тока

$$I_p = I_n \sin \varphi = 1,15 \cdot 0,6 = 0,69 \text{ А.}$$



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем принцип работы синхронного двигателя?
2. С какой целью на роторе синхронного двигателя размещают короткозамкнутую обмотку?
3. С какой целью обмотка возбуждения на время пуска синхронного двигателя замыкается на сопротивление?
4. Какие потери имеют место при работе синхронных машин?



### ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

1. Определите КПД синхронного двигателя, потребляющего из сети полную мощность  $S_1 = 60$  кВт, имеющего коэффициент мощности  $\cos \varphi = 0,8$  и суммарную мощность потерь в двигателе  $\sum P = 4$  кВт.
2. Найдите реактивную мощность, потребляемую синхронным двигателем из сети, если этот двигатель включен в сеть с напряжением 220 В, потребляет линейный ток 112 А и развивает мощность на валу 36 кВт с КПД  $\eta = 0,95$ .
3. Рассчитайте КПД синхронного двигателя, включенного в сеть с напряжением 220 В, потреблением тока  $I_n = 25$  А при коэффициенте мощности  $\cos \varphi = 0,8$ . Суммарная мощность потерь в двигателе  $\sum P = 1$  кВт.



### ТЕМЫ ДОКЛАДОВ И РЕФЕРАТОВ

1. Принцип действия, конструкция и область применения синхронных двигателей.
2. Устройство и пуск синхронных двигателей.
3. Регулирование реактивной мощности в синхронном двигателе.
4. Синхронные микродвигатели.

## 7.4. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### 7.4.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Машины постоянного тока применяют в качестве электродвигателей и генераторов. Двигатель и генератор постоянного тока имеют одинаковое устройство. Электродвигателям постоянного тока присущи хорошие регулировочные свойства и значительная перегрузочная способность. Они позволяют получать жесткие и мягкие механические характеристики.

Конструкция двигателей постоянного тока сложнее, и их стоимость выше, чем асинхронных двигателей.

Однако в связи с широким применением автоматизированного электропривода и тиристорных преобразователей, позволяющих питать электродвигатели постоянного тока регулируемым напряжением от сети переменного тока, эти электродвигатели широко используют в различных отраслях экономики.

Генераторы постоянного тока ранее широко использовались для питания электродвигателей постоянного тока в стационарных

и передвижных установках, а также как источники электрической энергии для заряда аккумуляторных батарей, питания электролизных и гальванических ванн, для электроснабжения различных электрических потребителей на автомобилях, самолетах, пассажирских вагонах, электровозах, тепловозах и др.

Принципиальная возможность создания электродвигателя постоянного тока была впервые показана М. Фарадеем в 1821 г. В созданном им приборе проводник, по которому пропускали постоянный ток, вращался вокруг магнита.

Двигатель постоянного тока с электромагнитным возбуждением был создан в России академиком Б. С. Якоби в 1834 г., который назвал его магнитной машиной. В 1838 г. им был построен более мощный электродвигатель, который использовался для привода гребного винта речного катера. Значительное развитие теория электрических машин постоянного тока получила в трудах Д. А. Лачинова. В 1880 г. он опубликовал труд «Электромеханическая работа», в котором рассмотрел вопросы создания вращающего момента электродвигателя, КПД электрических машин, условия питания электродвигателя от генератора и дал классификацию машин постоянного тока по способу возбуждения.

В XX столетии продолжались развитие теории и совершенствование конструкции машин постоянного тока. Большое внимание обращалось на повышение надежности этих машин путем устранения причин, вызывающих возникновение искрения под щетками (улучшения коммутации) и образование кругового огня на коллекторе.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какова область применения генераторов постоянного тока?
2. Какой русский ученый впервые сконструировал электрический двигатель постоянного тока?
3. В чем состоят преимущества и недостатки двигателей постоянного тока по сравнению с двигателями переменного тока?

### 7.4.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Действие любого электрического генератора основано на использовании закона электромагнитной индукции, поэтому генератор постоянного тока, как и генератор переменного тока, состоит из полюсов и якоря с обмоткой. Простейшим генератором является виток, вращающийся в магнитном поле полюсов  $N$  и  $S$  (рис. 7.18).

В витке 1 индуцируется переменная во времени ЭДС. При соединении концов витка к контактным кольцам, вращающимся вместе с витком, в нагрузке через неподвижные щетки 2, 3 протекает переменный ток, т.е. такая машина является генератором переменного тока. Для преобразования переменного тока в постоянный применяют коллектор, который играет роль механического выпрямителя переменного тока, индуцируемого в витке 1. Концы витка 1 присоединяют к двум медным полукольцам (сегментам), называемым коллекторными пластинами. При вращении витка коллекторные пластины вращаются с валом машины так, что каждая из щеток 2, 3 соприкасается то с одной, то с другой пластиной.

Щетки на коллекторе устанавливаются так, чтобы они переходили с одной пластины на другую в тот момент, когда ЭДС, индуцируемая в витке, будет равна нулю. Таким образом, щетка 2 в любой момент времени соприкасается с проводником, который находится под полюсом  $S$ , а щетка 3 контактирует всегда только с тем из проводников, который находится под полюсом  $N$ . Следовательно, ЭДС на щетках 2 и 3 не меняет знака и ток по внешнему участку электрической цепи будет протекать в одном направлении от щетки 2 через сопротивление  $R$  к щетке 3.

Направление ЭДС во внешней цепи остается неизменным, а величина ее меняется во времени и получается не постоянная, а пульсирующая ЭДС, и соответственно ток во внешней цепи будет также пульсирующим (рис. 7.19).

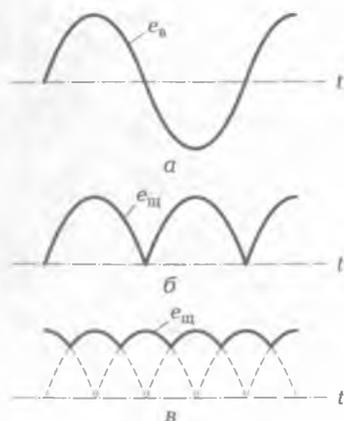
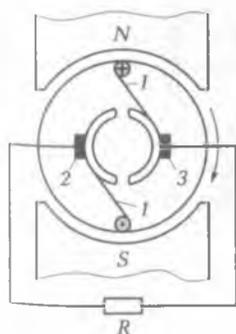


Рис. 7.18. Схема устройства генератора постоянного тока:  
1 — виток; 2, 3 — щетки

Рис. 7.19. Кривые изменения ЭДС во времени:  
а — в витке ( $e_n$ ); б — на щетках ( $e_{щ}$ ) при двух коллекторных пластинах; в — на щетках при четырех коллекторных пластинах

При увеличении числа коллекторных пластин пульсация тока во внешней цепи уменьшается и при 16 пластинах на пару полюсов пульсация составляет менее 1%. Таким образом, при большом числе коллекторных пластин ЭДС и ток во внешней цепи будут практически постоянны.

Как и всякая электрическая машина, генератор постоянного тока имеет неподвижную и вращающуюся части. Неподвижная часть машины называется *индуктирующей*, т.е. создающей магнитное поле, а вращающаяся — *индуктируемой*.

Машина постоянного тока с одной парой полюсов ( $p = 1$ ) представлена на рис. 7.20. Число полюсов может быть и больше, но это всегда четное число, т.е.  $2p$ .

На внутренней поверхности стального корпуса станины 6 статора укреплены полюсы 4 с обмотками возбуждения 5. Обмотки возбуждения питаются постоянным током и создают магнитный поток, который замыкается через станину статора, сердечники полюсов, воздушные зазоры и сталь якоря 3. С торцов корпус машины закрыт подшипниковыми щитами 7 и 10. На роторе расположены якорь 3 с коллектором 1 и вентилятор 8 для охлаждения машины. Вал ротора закреплен на подшипниках для уменьшения

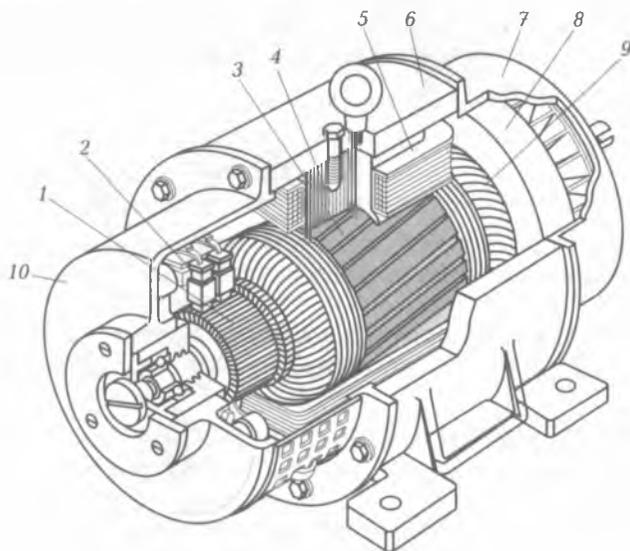


Рис. 7.20. Устройство машины постоянного тока:

1 — коллектор; 2 — щетки; 3 — якорь; 4 — главный полюс; 5 — полюсная катушка обмотки возбуждения; 6 — станина; 7, 10 — подшипниковые щиты; 8 — вентилятор; 9 — обмотка якоря

потерь при вращении. С помощью специальных муфт он соединяется с механическим устройством. Якорь представляет собой цилиндрический сердечник, в пазах которого уложены и закреплены медные проводники. Эти проводники, соединенные в определенном порядке, образуют замкнутую обмотку якоря. Коллектор имеет форму цилиндра и состоит из медных пластин, изолированных друг от друга и от вала. К каждой пластине присоединены начала проводников обмотки якоря. Обмотка якоря с внешней цепью связана через щетки 2, которые пружинами плотно прижаты к коллектору. Щеткодержатели крепятся на подшипниковом щите 10 машины.

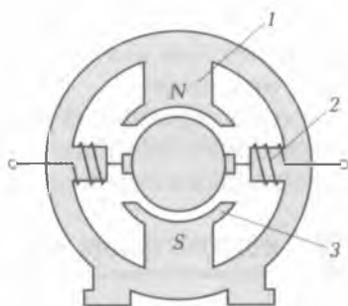


Рис. 7.21. Схема включения обмотки добавочных полюсов: 1 — основные полюса; 2 — дополнительные полюса; 3 — компенсационная обмотка

Рассмотрим **особенности работы машин постоянного тока**. При прохождении тока в скользящем контакте щеток с коллектором возможно возникновение искрения, которое, естественно, нежелательно, поскольку разрушает коллектор и щетки. Для уменьшения искрения необходимы периодическая проточка, шлифовка коллектора и другие меры для поддержания хорошего качества скользящего контакта.

Ток якоря создает в машине собственный магнитный поток, который искажает и даже уменьшает магнитный поток машины. Это явление называется **реакцией якоря**. Из-за реакции якоря снижается ЭДС машины и ухудшаются условия работы коллектора, при этом усиливается искрение под щетками. Для улучшения коммутации между основными полюсами 1 машины устанавливают дополнительные полюса 2 (рис. 7.21). Токи обмоток коллектора создают в зоне коммутации магнитный поток, противоположный магнитному потоку якоря.

Для полной компенсации реакции якоря в пазах основных полюсов машины укладывают компенсационную обмотку 3, поток, создаваемый этой обмоткой, направлен противоположно потоку обмотки якоря.



### Запомните

- Двигатель и генератор постоянного тока имеют одинаковое устройство.

- Сердечник якоря и полюсов набирают из листов электротехнической стали для уменьшения потерь на вихревые токи и перемагничивание.
- Главная особенность машины постоянного тока — наличие коллектора и скользящего контакта между обмоткой якоря и внешней электрической цепью.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы устройство и принцип работы генератора постоянного тока?
2. В чем состоит принципиальное отличие в устройстве генератора постоянного тока от генератора переменного тока?
3. Каковы назначение и устройство коллектора?
4. Для чего сердечник якоря и полюсов набирают из листов электротехнической стали?

### 7.4.3. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электродвижущие силы, индуцируемые в отдельных проводниках обмотки якоря, прямо пропорциональны индукции магнитного поля, длине проводника и скорости перемещения проводника в этом поле в направлении, перпендикулярном направлению магнитных линий поля:

$$e = Blv.$$

На якоре машины постоянного тока укладывается большое число активных проводников, которые обозначим буквой  $N$ . В каждой параллельной ветви обмотки будут последовательно включено  $N/2a$  активных проводника и суммарная ЭДС машины

$$E = \frac{N}{2a} Blv.$$

Скорость перемещения проводников в магнитном поле

$$v = \frac{2p\tau n}{60},$$

где  $2p$  — число полюсов машины;  $\tau$  — полюсное деление, т. е. расстояние между центрами разноименных полюсов;  $n$  — частота вращения якоря машины.

Магнитный поток одного полюса машины

$$\Phi = Bl\tau.$$

Электродвижущая сила машины

$$E = \frac{p}{a} N \frac{n}{60} \Phi.$$

Постоянный коэффициент, зависящий от конструктивных данных машины,

$$C_E = \frac{pN}{60a}.$$

Тогда

$$E = C_E n \Phi.$$

Суммарная ЭДС  $E$  машины постоянного тока прямо пропорциональна частоте вращения ротора  $n$  и магнитному потоку  $\Phi$ .

### **!** Запомните

- Регулировку ЭДС и напряжения генератора постоянного тока производят изменением магнитного потока, который зависит от тока возбуждения.
- В цепь возбуждения включается реостат, с изменением сопротивления которого изменяется и ток возбуждения.

### **?** КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. От каких параметров зависит ЭДС, индуцируемая в отдельных проводниках обмотки якоря?
2. Как производят регулировку ЭДС и напряжения генератора постоянного тока?
3. От каких параметров зависит магнитный поток одного полюса машины постоянного тока?

#### 7.4.4. РАБОТА ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Если обмотку якоря замкнуть на внешнее сопротивление  $R_n$  (рис. 7.22), то уравнение электрического состояния якорной цепи генератора имеет вид

$$E = I_a R_n + I_a R_a = I_a R_a + U,$$

где  $R_a$  — внутреннее сопротивление обмотки якоря с учетом сопротивления щеточного контакта;  $U$  — напряжение на зажимах генератора,  $U = I_a R_n$ .

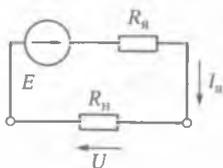


Рис. 7.22. Электрическая схема замещения цепи якоря генератора постоянного тока

Отсюда

$$U = E - I_{\text{я}} R_{\text{я}} \quad (7.4)$$

Уравнение (7.4) определяет вид внешней характеристики генератора постоянного тока. Из этого уравнения можно получить уравнения мощностей генератора:

$$UI_{\text{я}} = EI_{\text{я}} - I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}$$

$$P_2 = P_3 - P_{\text{об}}$$

где  $P_2$  — полезная мощность генератора, отдаваемая потребителю электрической энергии;  $P_3$  — электромагнитная мощность генератора, преобразованная им в электрическую;  $P_{\text{об}}$  — потери мощности в обмотках якоря и щеточных контактах.

При холостом ходе генератора электромагнитная мощность равна нулю ( $P_3 = 0$ ), но для вращения якоря машины первичный двигатель должен затратить некоторую мощность  $P_0$ , расходуемую на потери 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  $P_{\text{ст}}$ :

$$P_0 = P_{\text{мех}} + P_{\text{ст}}$$

В генераторах с самовозбуждением в мощность  $P_0$  входит мощность, затраченная на создание магнитного потока, т. е. на возбуждение машины.

Электромагнитный момент генератора постоянного тока

$$M_3 = \frac{P_3}{\Omega}$$

где  $\Omega$  — угловая скорость якоря, рад/с,  $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ .

Так как

$$P_3 = EI_{\text{я}}$$

$$E = \frac{Np}{2\pi a} n\Phi_1$$

то электромагнитный момент генератора определяется следующим выражением:

$$M_{\text{э}} = \frac{Np}{2\pi a} \Phi I_{\text{я}}$$

Величины  $a$ ,  $P$  и  $N$  постоянны для данной машины, поэтому выражение — некоторый постоянный для данной машины коэффициент. Электромагнитный момент генератора постоянного тока

$$M_{\text{э}} = C_{\text{э}} \Phi I_{\text{я}}$$

### **!** Запомните

- Электромагнитный момент генератора постоянного тока зависит от магнитного потока полюсов и тока якоря.
- Электромагнитный момент в генераторном режиме направлен в сторону, противоположную вращению ротора, т. е. является тормозным.

### **?** КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какой вид имеет уравнение электрического состояния якорной цепи генератора постоянного тока? Напишите его.
2. От чего зависит электромагнитный момент генератора постоянного тока?
3. Чему равна электромагнитная мощность генератора постоянного тока при холостом ходе?
4. Куда направлен электромагнитный момент в генераторном режиме машины постоянного тока?

## **7.4.5. СПОСОБЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Свойства генераторов постоянного тока обусловлены в основном способом питания обмотки возбуждения (рис. 7.23). В зависимости от этого различают четыре типа генераторов:

1) с независимым возбуждением — обмотка возбуждения получает питание от постороннего источника постоянного тока (см. рис. 7.23, а);

2) параллельным возбуждением — обмотка возбуждения подключена к обмотке якоря параллельно нагрузке (см. рис. 7.23, б);

3) последовательным возбуждением — обмотка возбуждения включена последовательно с обмоткой якоря и нагрузкой (см. рис. 7.23, в);

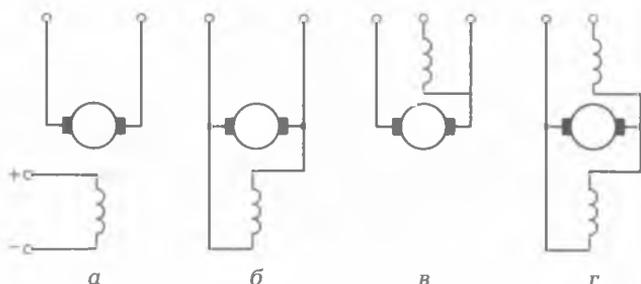


Рис. 7.23. Схемы возбуждения машин постоянного тока:

*а* — независимое; *б* — параллельное; *в* — последовательное; *г* — смешанное

4) со смешанным возбуждением — имеются две обмотки возбуждения: одна подключена параллельно нагрузке, а другая — последовательно с ней (см. рис. 7.23, *г*).

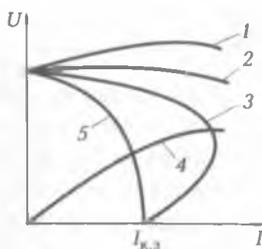
**Генератор с независимым возбуждением.** Достоинствами генераторов с независимым возбуждением являются возможность регулирования напряжения в широких пределах от нуля до  $U_m$  путем изменения тока возбуждения и сравнительно малое изменение напряжения под нагрузкой. Однако для питания обмотки возбуждения таких генераторов требуются внешние источники постоянного тока.

**Генератор с параллельным возбуждением.** Большинство генераторов постоянного тока, выпускаемых российской промышленностью, имеют параллельное возбуждение. При необходимости такие генераторы можно включать и по схеме с независимым возбуждением.

**Генератор с последовательным возбуждением.** В генераторе с последовательным возбуждением напряжение сильно изменяется при изменении нагрузки, а при холостом ходе оно близко к нулю. Такие генераторы непригодны для питания большинства электрических потребителей. Их используют лишь при электрическом торможении двигателей с последовательным возбуждением, которые при этом переводятся в генераторный режим.

**Генератор со смешанным возбуждением.** В этом генераторе имеются две обмотки возбуждения: основная (параллельная) и вспомогательная (последовательная). Согласно включение двух обмоток позволяет получить приблизительно постоянное напряжение генератора при изменении нагрузки. Встречное включение последовательной и параллельной обмоток возбуждения применяют в сварочных генераторах и других специальных машинах, где требуется ограничить ток короткого замыкания.

рис. 7.24. Внешние характеристики генераторов постоянного тока в зависимости от способа возбуждения



Мощность, затрачиваемая на возбуждение, относительно невелика (1—5% номинальной мощности машины постоянного тока), что позволяет экономично регулировать напряжение. Уровень напряжения генераторов постоянного тока обычно поддерживается с помощью автоматических регуляторов.

Большой практический интерес представляет внешняя характеристика генератора, которая показывает, как меняется выходное напряжение генератора  $U$  при увеличении тока  $I$  через нагрузку. Вид внешних характеристик генератора постоянного тока при различных способах возбуждения представлен на рис. 7.24.

На кривых 2, 3 (для генераторов независимого и параллельного возбуждения) напряжение снижается при увеличении нагрузки, причем для генератора параллельного возбуждения в большей степени, так как при его нагрузке уменьшается и ток возбуждения.

При постепенном уменьшении сопротивления нагрузки до нуля ток  $I_{к.з.}$  короткого замыкания генератора параллельного возбуждения невелик, так как напряжение на обмотке возбуждения становится равным нулю и ЭДС определяется только потоком остаточного намагничивания.

При мгновенном коротком замыкании ток велик, так как ЭДС машины в начальный момент не успевает измениться.

Для кривой 4 (для генератора последовательного возбуждения) характерно увеличение напряжения при увеличении нагрузки, поскольку при этом возрастает ток возбуждения. Вид внешней характеристики (кривые 1, 5) генератора смешанного возбуждения зависит от способа включения обмоток. При их согласном включении (кривая 1) напряжение с ростом нагрузки может немного возрасти. При встречном включении обмоток (кривая 5) внешняя характеристика имеет резко падающий характер, так как при увеличении нагрузки ток последовательной обмотки создает магнитный поток, противоположный потоку параллельной обмотки. Такую внешнюю характеристику имеет сварочный генератор, для которого режим короткого замыкания является эксплуатационным.



## Запомните

- В машинах постоянного тока для создания магнитного потока используется электромагнитное возбуждение.
- Внешняя характеристика генератора постоянного тока показывает, как меняется выходное напряжение генератора при увеличении тока через нагрузку.
- Напряжение в генераторах регулируют изменением тока в обмотке возбуждения.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем обусловлены свойства генераторов постоянного тока?
2. Какие способы включения обмоток возбуждения генератора постоянного тока вы знаете?
3. Как называется характеристика генератора, показывающая, как меняется выходное напряжение генератора при увеличении тока через нагрузку?
4. Как регулируется напряжение генераторов постоянного тока?



## ТЕМЫ ДОКЛАДОВ И РЕФЕРАТОВ

1. Применение генераторов постоянного тока в промышленности.
2. Коммутация тока в генераторе постоянного тока.
3. Характеристики генератора постоянного тока.

### 7.4.6. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Двигатели постоянного тока нашли широкое применение в промышленности. К ним относятся:

- краны различных тяжелых производств;
  - привод с требованиями регулировки скорости в широком диапазоне и высоким пусковым моментом;
  - тяговый электропривод тепловозов, электровозов, теплоходов, карьерных самосвалов;
  - стартеры автомобилей, тракторов и др.
- Достоинства двигателя постоянного тока:**
- простота устройства и управления;
  - практически линейные механическая и регулировочная характеристики двигателя;



Рис. 7.25. Коллекторный двухполюсный двигатель постоянного тока

- легкость регулирования частоты вращения;
- хорошие пусковые свойства (большой пусковой момент);
- возможность использования двигателей постоянного тока как в двигательном, так и в генераторном режимах, так как они являются обратимыми машинами.

**Недостатки:**

- дороговизна изготовления;
- необходимость профилактического обслуживания коллекторно-щеточных узлов;
- ограниченный срок службы из-за износа коллектора.

При современном развитии технологии конструирования и эксплуатации двигателей постоянного тока последние два недостатка почти не ощутимы.

Внешний вид коллекторного двухполюсного двигателя постоянного тока представлен на рис. 7.25.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Какова область применения двигателей постоянного тока?
2. В чем состоят достоинства и недостатки двигателя постоянного тока?

### 7.4.7. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Двигатели постоянного тока дают возможность плавно и экономично регулировать скорость вращения в широких пределах. В результате этого свойства двигатели постоянного тока получили широкое распространение.

Число оборотов якоря двигателя при любой схеме возбуждения определяется следующим выражением:

$$n = \frac{U_c - I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_c)}{C_E \Phi}$$

где  $U_c$  — напряжение сети;  $I_{\text{я}}$  — ток в обмотке якоря;  $R_{\text{я}}$  — сопротивление цепи обмотки якоря;  $R_c$  — сопротивление последовательной обмотки возбуждения (для двигателя параллельного возбуждения  $R_c = 0$ );  $C_E$  — постоянная величина электрической машины;  $\Phi$  — магнитный поток.

Это выражение показывает, что изменение скорости вращения двигателя можно осуществить тремя способами: включением реостата с сопротивлением  $R_n$  в цепь обмотки якоря, изменением питающего напряжения  $U_c$ , изменением магнитного потока  $\Phi$ .

**Включение реостата в цепь обмотки якоря.** Такой способ регулирования весьма прост и позволяет осуществлять плавное регулирование частоты вращения в широком диапазоне. Однако при этом возникают большие потери энергии в регулирующем реостате, вследствие чего его практически применяют только при кратковременных режимах работы двигателя, например при пуске. Другим недостатком рассматриваемого способа регулирования является то, что частоту вращения можно только уменьшать от  $n_1$  до нуля.

**Изменение питающего напряжения.** При изменении питающего напряжения частота вращения  $n$  изменяется пропорционально  $U$ . Питание тяговых двигателей от генератора осуществляется на тепловозах, а от выпрямителя — на электровозах и электропоездах переменного тока. На электровозах и электропоездах выпрямитель подключают к трансформатору, позволяющему изменять напряжение, подаваемое на вход выпрямителя, а следовательно, и его выходное напряжение  $U$ . На тепловозах в цепях управления имеется специальная электрическая аппаратура, дающая возможность изменять ток возбуждения генератора, т. е. его выходное напряжение  $U$ , ручным способом или автоматически.

Несмотря на то что рассмотренный способ требует довольно сложного оборудования, его широко применяют на современных локомотивах и электропоездах, так как он обеспечивает плавное и экономичное (без потерь энергии в реостатах) регулирование частоты вращения в очень широких пределах.

**Изменение магнитного потока.** Для того чтобы изменить магнитный поток  $\Phi$ , регулируют ток возбуждения двигателя с помощью регулировочного реостата. Данный способ регулирования прост и экономичен, поэтому его широко применяют на локомоти-

вах и электропоездах. Однако в этом случае регулирование частоты вращения можно осуществлять только в сравнительно небольшом диапазоне.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. От каких параметров зависит число оборотов якоря двигателя постоянного тока?
2. Какие способы изменения скорости вращения двигателя постоянного тока вам известны?
3. Какой из способов регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока применяют на транспорте?

### 7.4.8. ПУСК В ХОД ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для пуска двигателя могут быть применены три способа: прямой пуск, реостатный пуск и пуск путем изменения питающего напряжения.

**Прямой пуск.** При прямом пуске обмотка якоря электродвигателя подключается непосредственно к сети. Обычно в электродвигателях постоянного тока падение напряжения во внутреннем сопротивлении цепи обмотки якоря при номинальном токе составляет 5—10% от  $U_{\text{ном}}$ , поэтому при прямом пуске ток  $I_{\text{я}} = (10—20)I_{\text{ном}}$ , что недопустимо для машины. По этой причине прямой пуск применяют только для двигателей очень малой мощности (до нескольких сотен ватт). При прямом пуске таких двигателей пусковой ток  $I_{\text{пуск}} = (4—6)I_{\text{ном}}$ .

**Реостатный пуск.** Наибольшее применение получил реостатный пуск, при котором для ограничения тока в цепь якоря включают пусковой реостат  $R_{\text{п}}$  (рис. 7.26), который обычно имеет несколько ступеней (секций)  $R1, R2, R3$ , замыкающихся в процессе пуска короткими специальными выключателями (контакторами) 1, 2 и 3. При этом сопротивление реостата постепенно уменьшается, что обеспечивает высокое значение пускового момента в течение всего времени разгона двигателя.

В процессе реостатного пуска происходят некоторые колебания тока и пускового мо-

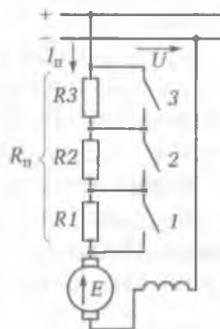


Рис. 7.26. Принципиальная схема реостатного пуска электродвигателя

мента (силы тяги). Однако при достаточно большом числе ступеней пускового реостата эти колебания не оказывают вредного влияния на работу подвижного состава.

Реостатный пуск электродвигателей с независимым и параллельным возбуждением осуществляется так же, как и в двигателях с последовательным возбуждением, путем постепенного выключения отдельных ступеней пускового реостата.

Реостатный пуск применяют на электровозах и электропоездах. При приблизительно постоянной массе поезда, характерной для электропоездов, выключение ступеней пускового реостата производят автоматически. Для этой цели на электропоездах предусмотрено специальное реле ускорения (реле минимального тока), срабатывающее, когда пусковой ток уменьшается до установленного значения, и тем самым обеспечивающее замыкание соответствующих контакторов. На электровозах ступени пускового реостата выключаются по мере увеличения скорости движения поезда непосредственно самим машинистом с помощью ручного аппарата, называемого контроллером машиниста. Однако на некоторых электровозах применяют автоматическое выключение ступеней пусковых реостатов с той или иной скоростью.

**Пуск путем изменения питающего напряжения.** При реостатном пуске возникают довольно большие потери энергии в пусковом реостате. Этот недостаток можно устранить, если пускать двигатель путем плавного повышения напряжения, подаваемого на обмотку якоря. Такой пуск называют **безреостатным**. Для этого необходимо иметь отдельный источник постоянного тока с регулируемым напряжением (генератор или управляемый выпрямитель). Безреостатный пуск применяют на электроподстанциях переменного тока и тепловозах.

Среди всех электродвигателей двигатели постоянного тока имеют лучшие пусковые свойства. При относительно небольшом пусковом токе  $(2 - 2,5)I_n$  они могут создавать достаточно большой пусковой момент  $(2,5 - 4)M_n$ .

**Реверс**, т. е. изменение направления вращения двигателя, можно осуществить, изменив направление вращения вращающегося момента  $M$ . Обычно для реверса изменяют полярность напряжения на обмотке якоря, т. е. направление тока в обмотке якоря.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы способы пуска двигателя?

2. Какой способ пуска двигателя постоянного тока применяют на транспорте?
3. Какие меры необходимо применить для реверса двигателя?

### 7.4.9. МЕХАНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА



Зависимость установившейся частоты вращения от электромагнитного момента двигателя  $n = f(M)$  называется **механической характеристикой**.

Механическая характеристика имеет наибольшее практическое применение.

Механическая характеристика, полученная при номинальных значениях напряжения питания и отсутствии добавочного сопротивления в цепи якоря, называется **естественной**.

Механические характеристики двигателей с разным возбуждением представлены на рис. 7.27. Кривая 1 на всех рисунках — **естественная характеристика**, а кривая 2 — **искусственная**, полученная при включении добавочного сопротивления в цепь якоря двигателя.

Для **двигателей независимого и параллельного возбуждения** механическая характеристика линейна (см. рис. 7.27, а). При увеличении момента частота вращения уменьшается. Если это снижение скорости незначительно ( $\delta n$ ), то характеристика называется **жесткой** (кривая 1). Чем больше сопротивление в цепи якоря, тем «мягче» характеристика (кривая 2), тем больше изменение частоты вращения ( $\Delta n$ ).

**Двигатель последовательного возбуждения** имеет мягкую механическую характеристику (см. рис. 7.27, б), так как при увели-

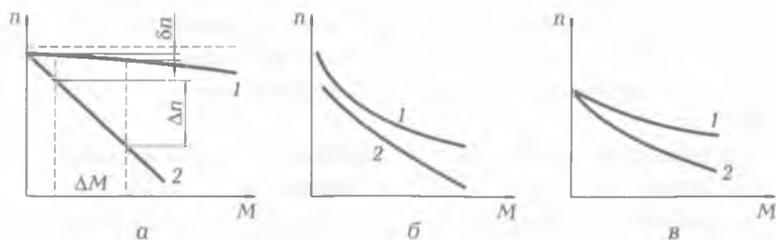


Рис. 7.27. Механические характеристики двигателей постоянного тока с разным возбуждением:

а — для двигателей независимого и параллельного возбуждения; б — для двигателей последовательного возбуждения; в — для двигателей смешанного возбуждения; 1 — естественная характеристика; 2 — искусственная характеристика

чении момента  $M$  и возрастании тока якоря возрастает магнитный поток  $\Phi$  и частота вращения двигателя снижается. Особенность двигателей последовательного возбуждения состоит в том, что при холостом ходе и небольшой нагрузке ток и поток уменьшаются, а его скорость сильно возрастает. Двигатель идет «вразнос», что может привести к его разрушению. На валу двигателя должна быть нагрузка не менее 25 % номинальной.

Характерной особенностью двигателя последовательного возбуждения является резкое увеличение частоты вращения при снижении нагрузки.

Механическая характеристика **двигателя смешанного возбуждения** (см. рис. 7.27, в) занимает среднее положение между характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения. Характеристика мягкая, но из-за наличия параллельной обмотки частота вращения на холостом ходу *ограничена*.



#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какая характеристика двигателя называется механической?
2. Какая механическая характеристика называется искусственной, а какая — естественной?
3. Что является особенностью двигателей последовательного возбуждения?

### 7.4.10. ТОРМОЖЕНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для быстрой остановки двигателя постоянного тока осуществляют торможение с помощью механических тормозов или электрическими способами. К электрическим способам относятся рекуперативное и динамическое торможения и торможение противовключением.

При **рекуперативном и динамическом торможениях** машина переводится из двигательного в генераторный режим, при этом электромагнитный момент становится тормозным. Рекуперативное торможение (с возвратом энергии в сеть) обеспечивается созданием условий, при которых скорость двигателя превышает скорость идеального холостого хода  $n_0$  (например, увеличением тока возбуждения). При этом ЭДС якоря  $E_a$  становится больше напряжения сети  $U_c$ , ток якоря изменяет свое направление и электромагнитный

момент будет тормозным, а электрическая энергия отдается в сеть. Рекуперативное торможение возможно лишь при параллельном возбуждении.

**Динамическое торможение** обеспечивается при замыкании якоря на резистор и при подключении обмотки возбуждения к источнику электрической энергии. При этом кинетическая энергия движущихся масс преобразуется в электрическую, рассеиваемую в виде теплоты на введенном в цепь якоря резисторе.

**Торможение противовключением** применяется при реверсировании двигателя на ходу. Для этого обмотки двигателя включаются для одного направления вращения, а якорь под воздействием внешнего момента вращается в противоположном направлении. Поскольку в этом случае ЭДС якоря оказывается направленной согласно питающему напряжению, для ограничения тока якоря в цепь последнего включают дополнительный резистор.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Какие способы торможения двигателя постоянного тока вы знаете?
2. Как проводится рекуперативное торможение двигателя?
3. В каком случае применяют торможение противовключением?



## ТЕМЫ ДОКЛАДОВ И РЕФЕРАТОВ

---

1. Применение двигателей постоянного тока на транспорте.
2. Микродвигатели.
3. Универсальные коллекторные машины.

# ПРОИЗВОДСТВО, РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

**К** В результате изучения данной главы вы должны:

- **уметь:**
  - составлять простые функциональные схемы передачи электроэнергии на расстояние;
  - составлять простейшую электрическую схему управления электроприводом;
- **знать:**
  - что такое электроэнергетические системы;
  - общую схему электроснабжения и передачи электрической энергии, классификацию электростанций, способы экономии электроэнергии;
  - состав электрических сетей, в том числе трансформаторные подстанции, распределительные устройства, линии электропередачи;
  - электроснабжение промышленных предприятий;
  - основные сведения об электроприводе;
  - принципы работы потребителей электрической энергии (установки электронагрева, электросварки, электрическое освещение).

## 8.1. ПРОИЗВОДСТВО И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

### 8.1.1. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Все технологические процессы любого производства связаны с потреблением энергии. На их выполнение расходуется подавляющая часть энергетических ресурсов. Важнейшую роль на промышленном предприятии играет электрическая энергия — самый

универсальный вид энергии, являющейся основным источником получения механической, тепловой и других видов энергии. Электроэнергия обладает рядом преимуществ по сравнению с другими видами энергии:

- ее легко получить из различных видов энергии и легко преобразовать с высоким КПД в другие виды энергии;
- места получения и потребления электроэнергии могут быть отдалены друг от друга. Это позволяет сооружать электрические станции вблизи энергетических источников и концентрировать большие производственные мощности вдали от них;
- электроэнергия с небольшими потерями передается на большие расстояния, причем эта передача происходит практически мгновенно;
- применение электроэнергии повышает производительность труда и позволяет автоматизировать производственные процессы;
- с использованием электроэнергии улучшаются бытовые условия населения, так как она экологически чиста и удобна в употреблении.

Производство, передача, распределение и потребление электрической энергии — единый процесс, происходящий одновременно.

Электроэнергию нельзя запасать и хранить на складе. Ее необходимо произвести в данное время и в таком количестве, которое требуется потребителю, поэтому производство электроэнергии должно возрастать или уменьшаться пропорционально ее потреблению.



**Электроэнергетические системы** — это совокупность электрических станций, подстанций и потребителей электроэнергии, связанных между собой линиями электропередачи и электрическими сетями при общем централизованном оперативном управлении.

Стандартная схема электроснабжения потребителей представлена на рис. 8.1. Электрическая энергия, вырабатываемая на электрической станции ЭС генераторами Г, передается при напряжении более высоком, чем генераторное, по ЛЭП высокого напряжения на подстанцию промышленного предприятия. Для изменения напряжения в системе применяются трансформаторы Т. Со сборных шин подстанции ПС электроэнергия распределяется по различным приемникам электрической энергии: электродвигателям М, источникам света Л, электротермическим установкам, нагревательным приборам Е и т. д.

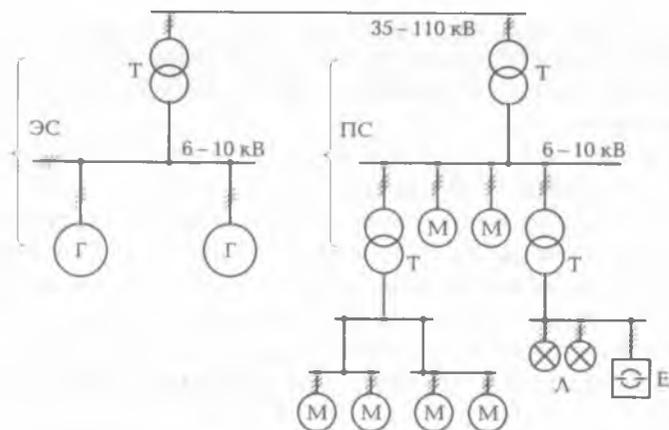


Рис. 8.1. Схема электроснабжения

Отдельные электростанции не могут обеспечить бесперебойную подачу электроэнергии, поэтому по мере развития энергетики электрические станции, которые объединяют в системы, работают параллельно на общую нагрузку. Их соединяют между собой ЛЭП.

К электростанциям, объединенным в *энергетические системы*, предъявляются следующие требования:

- соответствие мощности генераторов и трансформаторов максимальной мощности потребителей электроэнергии;
- достаточная пропускная способность ЛЭП;
- обеспечение бесперебойного электроснабжения при высоком качестве энергии;
- экономичность, безопасность и удобство в эксплуатации.

Объединение электростанций в электроэнергетическую систему имеет большое значение для согласования работы станций различных типов, особенно тепловых и гидроэлектростанций (ГЭС). Мощности гидроагрегатов ГЭС в периоды паводков и в зимнее время различны. Весной основную нагрузку системы воспринимают гидростанции, на тепловых же станциях часть агрегатов останавливается, что дает возможность экономить топливо и проводить плановые ремонтные работы. В зимнее время роли тепловых и гидроэлектростанций меняются. Таким образом, облегчается возможность создания экономически выгодных режимов для разных типов электростанций.

Создание энергосистем повышает надежность энергоснабжения и улучшает качество электроэнергии, обеспечивает постоян-

ство напряжения и частоты, поскольку колебания нагрузки воспринимаются многими электрическими станциями.

Электроэнергетические системы линиями высокого напряжения объединены в более крупные объединенные энергосистемы (ОЭС). При параллельной работе нескольких энергосистем в составе ОЭС указанные преимущества проявляются в еще большей степени.

В электрических устройствах энергосистем используют различные значения напряжения. Для уменьшения потерь при преобразовании и обеспечения оптимальной работы электрических устройств эти напряжения стандартизованы. Существует шкала стандартных номинальных напряжений переменного тока: 220, 380, 660 В; 3, 6, 10, 20, 35, 110, 150, 220, 330, 500, 750, 1 150 кВ. Напряжение для электрической установки выбирают исходя из минимума капитальных, эксплуатационных затрат, потерь электроэнергии и требований безопасности.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. В чем состоят преимущества электрической энергии по сравнению с другими видами энергии?
2. Что входит в электроэнергетические системы?
3. Для чего объединяют электростанции в электроэнергетическую систему?
4. Какие требования предъявляют к электростанциям, объединенным в энергетические системы?

### 8.1.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

Преобразование энергии различных видов в электрическую энергию происходит на электростанциях.



**Электростанциями** называются предприятия или установки, предназначенные для производства электроэнергии.

Топливом для электрических станций служат природные богатства: уголь, торф, вода, ветер, солнце, атомная энергия и т.д. В зависимости от вида преобразуемой энергии электростанции могут быть разделены на следующие основные типы: тепловые, атомные, гидроэлектростанции, гидроаккумулирующие, газотурбинные, а также маломощные электрические станции местного значения — ветряные, солнечные, геотермальные, морских приливов и отливов, дизельные и др.

Основная часть электроэнергии (до 80 %) вырабатывается на *тепловых электростанциях* (ТЭС). Процесс получения электрической энергии на ТЭС заключается в последовательном преобразовании энергии сжигаемого топлива в тепловую энергию водяного пара, приводящего во вращение турбоагрегат (паровую турбину, соединенную с генератором). Механическая энергия вращения преобразуется генератором в электрическую энергию. Топливом для электростанций служат каменный уголь, торф, горючие сланцы, естественный газ, нефть, мазут, древесные отходы. При экономичной работе ТЭС, т.е. при одновременном отпуске потребителем оптимальных количеств электроэнергии и теплоты, их КПД достигает более 70 %. В период, когда полностью прекращается потребление теплоты (например, в неотапительный сезон), КПД станции снижается.

*Атомные электростанции* (АЭС) отличаются от обычной паротурбинной станции тем, что на АЭС в качестве источника энергии используется процесс деления ядер урана, плутония, тория и др. В результате расщепления этих материалов в специальных устройствах — реакторах, выделяется огромное количество тепловой энергии.

По сравнению с ТЭС атомные электростанции расходуют незначительное количество горючего. Такие станции можно сооружать в любом месте, так как они не связаны с местом расположения естественных запасов топлива. Кроме того, окружающая среда не загрязняется дымом, золой, пылью и сернистым газом. Однако надо помнить о радиационной безопасности персонала и местного населения, проживающего вблизи станции, что является важной задачей при проектировании и эксплуатации АЭС.

На *гидроэлектростанциях* водная энергия преобразуется в электрическую с помощью гидравлических турбин и соединенных с ними генераторов. Принцип работы электростанции заключается в том, что поток воды, падающей с верхнего бьефа, направляется на лопатки рабочего колеса гидротурбины 1 (рис. 8.2), установленной на нижнем бьефе.

Колесо гидротурбины 1 вращает ротор электрического генератора 2, вырабатывающего электроэнергию. Мощность ГЭС зависит от расхода и напора  $H$  воды.

Различают ГЭС плотинного и деривационного типов. *Плотинные* ГЭС применяют на равнинных реках с небольшими напорами, *деривационные* (с обходными каналами) — на горных реках с большими уклонами и при небольшом расходе воды. Следует отметить, что работа ГЭС зависит от уровня воды, определяемого природными условиями. Достоинствами ГЭС являются их высокий КПД и низкая себестоимость выработанной электроэнергии. Однако

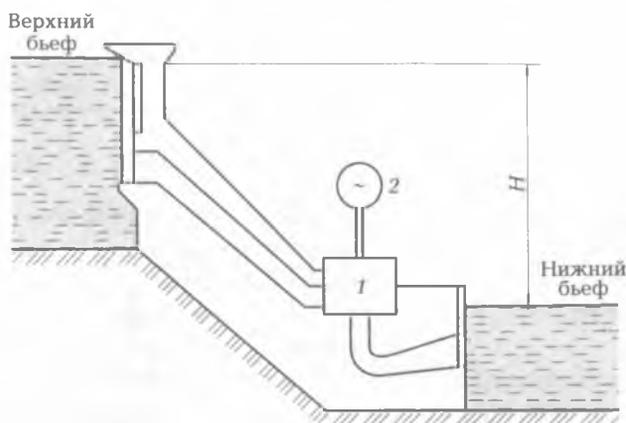


Рис. 8.2. Схема работы гидроэлектростанции:

1 — гидротурбина; 2 — электрический генератор

следует учитывать большую стоимость капитальных затрат при сооружении ГЭС и значительные сроки их сооружения.

Любая электростанция должна вырабатывать электроэнергию с возможно меньшими затратами. Для уменьшения стоимости 1 кВт установленной мощности на электростанциях одного и того же типа и параметров стремятся увеличить единичную мощность основных агрегатов и мощность электростанции в целом. Таким образом, с концентрацией мощностей удешевляется энергия и снижаются затраты на ее производство.

Примерная схема распределения электроэнергии, в которой объединены ГЭС, ТЭС и АЭС, находящиеся на значительном расстоянии от потребителей электроэнергии, а также теплоэлектроцентраль (ТЭЦ), расположенная в центре промышленного района, приведена на рис. 8.3.

Вырабатываемая генераторами электроэнергия (обычно напряжением 10 кВ) подается на повышающие трансформаторные подстанции, на которых напряжение повышается до 220 и 500 кВ, и по ЛЭП поступает на районную понижающую подстанцию А, служащую для связи между двумя станциями. Линии электропередачи Л1, Л2, Л3, Л4 образуют кольцевую сеть напряжением 110 кВ. Внутри этого кольца расположены понижающие трансформаторные подстанции с вторичным напряжением 10 кВ, питающие промышленные и сельскохозяйственные предприятия. В центре промышленного района расположена ТЭЦ, снабжающая потребителей электроэнергией и теплотой. От главной питающей понижающей подстанции (ГПП) электроэнергия подается на распределительный



3. В чем заключается принцип работы ГЭС?
4. Какова суть распределения электроэнергии по схеме рис. 8.3? Нарисуйте схему.

### 8.1.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ

Электрическую энергию от источников к потребителям передают с помощью **электрических сетей**. В их состав входят все сооружения по передаче, преобразованию и распределению электрической энергии: трансформаторные подстанции, открытые и закрытые распределительные устройства, ЛЭП.

Электрические сети классифицируют на следующие виды:

- **магистральные** — связывают отдельные регионы страны и их крупнейшие источники производства электроэнергии и центры потребления. Характеризуются сверхвысоким и высоким уровнем напряжения и большими потоками мощности (гигаватты);
- **региональные** — сети масштаба региона (в России — уровень субъектов Российской Федерации). Имеют питание от магистральных сетей и собственных региональных источников питания, обслуживают крупных потребителей (город, район, предприятие, месторождение, транспортный терминал). Характеризуются высоким и средним уровнем напряжения и большими потоками мощности (сотни мегаватт, гигаватты);
- **районные, распределительные** — имеют питание от региональных сетей. Обычно не имеют собственных источников питания, обслуживают средних и мелких потребителей (внутриквартальные и поселковые сети, предприятия, небольшие месторождения, транспортные узлы). Характеризуются средним и низким уровнем напряжения и небольшими потоками мощности (мегаватты);
- **внутренние** — распределяют электроэнергию на небольшом пространстве: в рамках района города, села, квартала, завода. Зачастую такие сети имеют всего одну или две точки питания от внешней сети, при этом иногда есть собственный резервный источник питания. Характеризуются низким уровнем напряжения и небольшими потоками мощности (сотни киловатт, мегаватты);
- **электропроводка** — сети самого нижнего уровня (отдельного здания, цеха, помещения). Характеризуются низким и бытовым уровнем напряжения и маленькими потоками мощности (десятки и сотни киловатт).



**Трансформаторная подстанция** — это электроустановка, предназначенная для преобразования и распределения электроэнергии. Подстанции могут быть закрытыми или открытыми в зависимости от расположения ее основного оборудования. Если оборудование находится в здании, то подстанция считается **закрытой**; если на открытом воздухе — **открытой**.

Оборудование подстанций может быть смонтировано из отдельных элементов устройств или блоков, поставляемых в собранном для установки виде. В оборудование подстанций входят аппараты, осуществляющие коммутацию и защиту электрических цепей.

Основной элемент подстанций — силовой трансформатор. Конструктивно силовые трансформаторы выполняются так, чтобы максимально отвести тепло, выделяемое ими при работе от обмоток и сердечника в окружающую среду. Для увеличения коэффициента мощности электроустановки на подстанциях устанавливают статические конденсаторы, компенсирующие реактивную мощность нагрузки.

Автоматическая система контроля и управления аппаратами подстанции следит за процессами, происходящими в нагрузке, сетях электроснабжения. Она выполняет функции защиты трансформатора и сетей, отключает при помощи выключателя защищаемые участки при аварийных режимах, осуществляет повторное включение, автоматическое включение резерва.

Трансформаторные подстанции промышленных предприятий подключаются к питающей сети различными способами в зависимости от требований надежности бесперебойного электроснабжения потребителей.

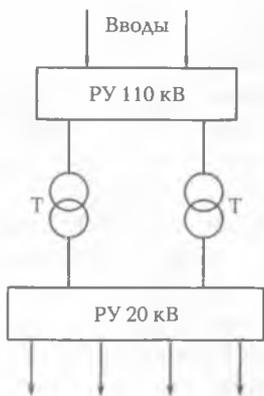


Рис. 8.4. Структурная схема распределительного устройства:

РУ — распределительное устройство



**Распределительные устройства** — это совокупность сооружений, предназначенных для приема и распределения электроэнергии (шины, выключатели, разъединители и др.).

Для различных по назначению напряжений сооружают отдельные распределительные устройства (рис. 8.4).

**Воздушные линии электропередачи.** Их выполняют из неизолированных прово-

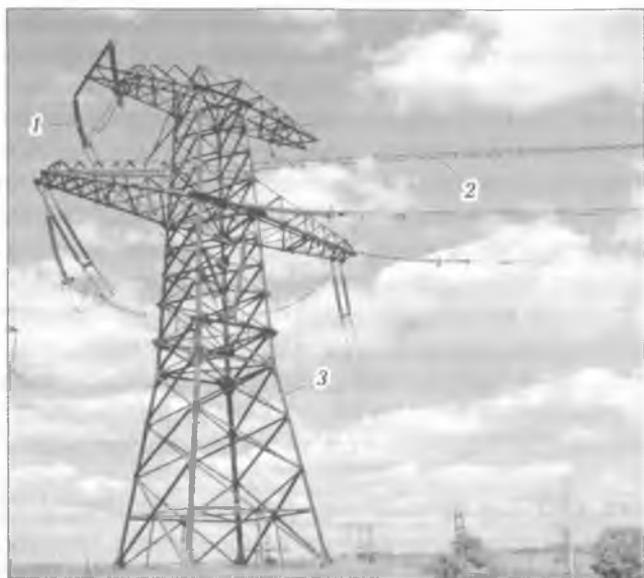


Рис. 8.5. Воздушная линия электропередачи:  
1 — изоляторы; 2 — неизолированные провода; 3 — опоры

дов 2, укрепленных на опорах 3 с помощью изоляторов 1 (рис. 8.5). На протяжении ЛЭП изолятором служит **воздух**. Провода бывают **одножильными, многожильными и специального профиля**.

Чаще всего используются многожильные проводники (рис. 8.6). Провода для электропередачи могут быть изготовлены из меди, алюминия, стали. Медь — дефицитный материал, поэтому для проводов ее используют крайне редко. Чаще всего применяют многожильные провода из стали и алюминия. Сердцевина такого провода стальная, а на нее навиты алюминиевые жилы. За счет этого получают хорошую электрическую проводимость (алюминий) и механическую прочность (сталь).

**Стальные провода.** Их используют преимущественно для защиты от молний и монтируют над фазными проводами в ЛЭП высокого и сверхвысокого напряжения.

Опоры (столбы) в зависимости от материала, из которого они изготовлены, бывают деревянными, железобетонными и металлическими. В настоящее время деревянные опоры используют очень редко. Железобетонные опоры дешевле и имеют

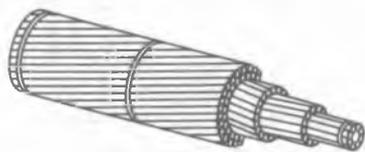


Рис. 8.6. Многожильный проводник

большой срок службы. Их применяют на ЛЭП до 110 В. Металлические опоры используют для ЛЭП высоких и сверхвысоких напряжений.

**Кабельные ЛЭП.** Линии электропередачи можно выполнять путем укладки кабелей в землю. Конструкция используемых кабелей определяется напряжением, числом и сечением жил, условиями работы. Токпроводящие жилы изготовляют из меди или алюминия. Кабели бывают *одно-* и *многожильными*. В зависимости от числа жил различают *одно-, двух-, трех- и четырехжильные* кабели. Четырехжильные кабели используют в сетях низкого напряжения, причем одна из жил является нулевым проводом.

Для кабельных ЛЭП не требуются трассы, они не подвержены влиянию атмосферных явлений, удобны для городских условий и др. Однако они капиталоемки, а их повреждения труднее обнаружить.

**Потери в ЛЭП.** Как правило, генераторы источника и потребители работают с низким номинальным напряжением. Потери энергии в линиях обратно пропорциональны квадрату напряжения, поэтому для снижения потерь электроэнергию выгодно передавать на высоких напряжениях. Для этого на выходе от генератора напряжение повышают, а на входе потребителя — понижают с помощью трансформаторов (рис. 8.7). Однако с ростом напряжения начинают происходить различные разрядные явления.

В воздушных линиях сверхвысокого напряжения присутствуют потери активной мощности на корону (коронный разряд). Эти потери зависят во многом от погодных условий (в сухую погоду потери меньше, а в дождь, изморось или снег эти потери возрастают) и расщепления провода в фазах линии.

Важной величиной, влияющей на экономичность ЛЭП переменного тока, является  $\cos \phi$  — характеризует соотношение между активной и реактивной мощностями в ЛЭП.

При длине ЛЭП переменного тока более нескольких тысяч километров наблюдается еще один вид потерь — радиоизлучение. Так как такая длина уже сравнима с длиной электромагнитной волны частотой 50 Гц, провод начинает работать как антенна.

**Короткое замыкание в электрических сетях.** Причинами короткого замыкания могут быть нарушенная изо-



Рис. 8.7. Схема преобразования электроэнергии при передаче на расстояние

ляция, порванные проводники, неправильные действия персонала и т. д. Ток, протекающий в этом случае, многократно превышает номинальный и приводит к большим перегревам и механическим нарушениям электрических сооружений.

### **!** Запомните

Для быстрого отключения линии при замыкании и для предохранения электрических сооружений от повреждений в начале каждой токопроводящей линии необходимо ставить защиту от максимального тока с помощью плавкого предохранителя, автоматических выключателей или реле максимального тока (в зависимости от конкретных требований).

### **?** КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие сооружения входят в состав электрических сетей?
2. На какие виды классифицируют электрические сети?
3. Каково назначение трансформаторной подстанции?
4. В чем состоит назначение распределительных устройств электрических сетей?
5. Из каких материалов изготавливают провода для электропередачи?
6. Каковы преимущества кабельных ЛЭП?
7. Какая защита ставится при быстром отключении ЛЭП?

## **8.1.4. ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Потребление электроэнергии промышленными предприятиями, транспортом, в быту, сельскохозяйственном производстве изменяется как в течение суток, так и в течение года.

**→** **Электрической нагрузкой** называют мощность, которую электрическое устройство или отдельный потребитель получает от сети, для электростанций это генерируемая ими мощность.

Знать электрическую нагрузку необходимо, чтобы рассчитывать и выбирать аппараты и токопроводящие элементы для использования их в электрических устройствах (аппаратах для управления и защиты, трансформаторах, проводниках, кабелях и др.).

Как правило, электрическая нагрузка не является постоянной.

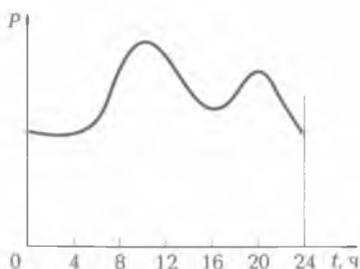


Рис. 8.8. Суточный график нагрузки промышленного предприятия

Режим потребления электроэнергии во времени характеризуется **графиком нагрузки** (рис. 8.8). Характер суточных графиков нагрузки зависит от состава потребителей (бытовая, промышленная, транспортная и др.). График бытовой нагрузки имеет резко выраженный вечерний максимум. Промышленная нагрузка изменяется в течение суток в зависимости от сменности предприятий.

По степени обеспечения надежности электроснабжения и бесперебойного питания все потребители электрической энергии делятся на три категории, определяющие число источников электроэнергии и схему электроснабжения.

К **первой категории** относятся потребители, перерыв электроснабжения которых может повлечь за собой опасность для жизни людей, значительный ущерб экономике, повреждение дорогостоящего оборудования, нарушение функционирования особо важных элементов коммунального хозяйства. Они должны получать электроэнергию не менее чем от двух независимых и взаимно резервирующих источников питания.

**Вторую категорию** образуют электроприемники, перерыв электроснабжения которых приводит к недоотпуску продукции, массовым простоям рабочих, механизмов и промышленного транспорта, нарушению нормальной деятельности значительного количества городских и сельских жителей. Они могут обеспечиваться электроэнергией от двух независимых источников. При нарушении электроснабжения от одного из них допустимы перерывы электроснабжения на время, необходимое для включения резервного питания дежурным персоналом или выездной оперативной бригадой.

В **третью категорию** входят все остальные виды потребителей электроэнергии. Электроснабжение этих потребителей допускается от одного источника.

Нормальная работа любого потребителя электроэнергии требует не только бесперебойного электроснабжения, но и обеспечения определенного **качества электрической энергии**, к показателям которого относятся: отклонения напряжения и частоты от заданных номинальных значений, колебания напряжения и частоты, несинусоидальность формы кривой напряжения, несимметрия трехфазной системы напряжения.

Допустимые отклонения напряжения для разных потребителей различны. Например, для освещения они составляют от  $-2,5$  до  $+5\%$ , для электродвигателей — от  $-5$  до  $+10\%$ ; для остальных потребителей — от  $\pm 5\%$  до номинального.

Электрическая нагрузка различных промышленных предприятий может быть от нескольких десятков до миллионов киловатт. Большинство приемников потребляет электрическую энергию переменного тока индуктивного характера. К ним прежде всего относятся асинхронные двигатели и трансформаторы. Мощность таких потребителей при заданных значениях тока и напряжения зависит от коэффициента мощности  $\cos \varphi$ . Коэффициент мощности показывает, как используется номинальная мощность источника.

При номинальном режиме потребители имеют довольно высокий  $\cos \varphi = 0,7 - 0,9$ , но при малой нагрузке коэффициент мощности мал. Наличие реактивной энергии в линиях и трансформаторах ведет к дополнительным потерям энергии и напряжения, уменьшает пропускную способность ЛЭП, поэтому по возможности стараются приближать источник реактивной энергии к местам ее потребления.

Источниками реактивной энергии являются так называемые **компенсирующие устройства**: конденсаторные батареи и синхронные компенсаторы. На промышленных предприятиях для компенсации реактивной мощности чаще применяют конденсаторные батареи.

Большое значение для промышленных предприятий в целях повышения коэффициента мощности имеет применение синхронных двигателей, позволяющих посредством изменения тока возбуждения регулировать потребление реактивной энергии.



### Запомните

Помимо применения компенсирующих устройств коэффициент мощности промышленных предприятий необходимо улучшать путем рационального использования установленных мощностей, ограничения режимов холостого хода двигателей и трансформаторов, замены малозагруженных двигателей двигателями меньшей мощности, упорядочения энергетического режима оборудования.



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называют электрической нагрузкой?
2. Как электрическая нагрузка предприятия изменяется в течение времени?

3. На какие категории по степени обеспечения надежности электроснабжения и бесперебойного питания делятся все потребители электрической энергии?
4. Какие параметры характеризуют качество электрической энергии?
5. Как повысить  $\cos \varphi$  потребителя?

## **Т** ТЕМЫ ДОКЛАДОВ И РЕФЕРАТОВ

---

1. Единая энергетическая система Российской Федерации.
2. Сравнительные технико-экономические показатели атомных, тепловых и гидравлических электростанций.
3. Перспективы развития атомной энергетики в мире.
4. Экономия электроэнергии как одна из основных экономических задач развития промышленности.
5. Производство и потребление электрической энергии как единый процесс.
6. Перспективы развития международной энергетической интеграции.

## **8.2.** ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

---

Создание первого электропривода относится к 1838 г., когда российский академик Б. С. Якоби произвел испытания электродвигателя постоянного тока с питанием от аккумуляторной батареи, который был использован для привода гребного винта судна. Начало широкого промышленного применения электропривода связано с открытием явления вращающегося магнитного поля и созданием трехфазного асинхронного электродвигателя, сконструированного русским инженером М. О. Доливо-Добровольским. В 1890-х гг. широкое распространение на промышленных предприятиях получил электропривод, в котором использовался асинхронный электродвигатель с фазным ротором для сообщения движения исполнительным органам рабочих машин.

В 1890 г. суммарная мощность электродвигателей по отношению к мощности двигателей всех типов, применяемых в промышленности, составила 5 %, уже в 1927 г. этот показатель достиг 75 %, а в 1976 г. приближался к 100 %.



**Электроприводом** называется электромеханическая система, преобразующая электрическую энергию в механическую энергию одного или нескольких рабочих механизмов.

Электропривод включает в себя системы преобразования, передачи и распределения энергии и управление этими процессами и бывает групповым, индивидуальным и взаимосвязанным.

В **групповом** приводе один электродвигатель приводит в движение с помощью разветвленной передачи группу механизмов или группу рабочих органов одного механизма, например несколько станков или различные рабочие органы одного станка.

В таком приводе кинематическая схема оказывается сложной и громоздкой, а сам привод неэкономичным, поэтому в настоящее время он находит ограниченное применение.

Привод, в котором электродвигатель приводит в движение только один рабочий орган, получил название **индивидуального**. Индивидуальный электропривод существенно упрощает кинематическую схему механизма, повышает экономичность и позволяет в ряде случаев встраивать электродвигатель непосредственно в механизм, что снижает его металлоемкость. Примером такого сочетания электродвигателя с рабочим органом может служить различный электроинструмент (электродрель, электроточило, электрошпиндель и др.).

**Взаимосвязанным** называют привод, в котором рабочие органы одного механизма приводятся в движение несколькими электродвигателями. Взаимосвязанный электропривод может состоять из нескольких индивидуальных электроприводов, участвующих в общем технологическом процессе и установленных на одном производственном комплекте.

Например, в металлорежущих станках устанавливают отдельные приводы главного движения заготовки режущего инструмента и приводы подачи. Промышленные роботы снабжаются несколькими отдельными приводами. Во взаимосвязанном приводе возможна работа нескольких электродвигателей на один рабочий орган, что позволяет снизить усилия в рабочем органе и передаче, распределить их в механизме более равномерно, избежать перекосов и т. д.

Качество работы современного электропривода во многом определяется правильным выбором используемого электрического двигателя, что, в свою очередь, обеспечивает продолжительную надежную работу электропривода и высокую эффективность технологических и производственных процессов в промышленности, на транспорте, в строительстве и других областях.

**Условия выбора электродвигателей.** Независимо от условий работы и вида рабочих механизмов электродвигатели для привода выбирают согласно общим правилам:

- должно быть полное соответствие между механическими свойствами двигателя и требованиями производственного механизма;
- мощность двигателя в процессе работы должна использоваться максимально;
- параметры двигателя (напряжение, частота) должны соответствовать параметрам сети;
- конструктивное исполнение двигателя должно соответствовать условиям окружающей среды (влажность, пожароопасность, взрывоопасность и др.);
- двигатель должен быть удобен и безопасен для обслуживающего персонала.

Правильный выбор типа, исполнения и мощности электрического двигателя определяет не только безопасность, надежность и экономичность работы и длительность срока службы двигателя, но и технико-экономические показатели всего электропривода в целом.

Функциональная схема электропривода приведена на рис. 8.9. Основными элементами функциональной схемы электропривода являются: регулятор Р, предназначенный для управления процессами, протекающими в электроприводе; электрический преобразователь ЭП, преобразующий электрическую энергию электрической сети в регулируемое напряжение постоянного или переменного тока; электромеханический преобразователь ЭМП — двигатель, преобразующий электрическую энергию в механическую; механический преобразователь МП, изменяющий скорость вращения двигателя, а также характер его движения (с поступательного на вращательное или с вращательного на поступательное); УВ — управляющее воздействие; ИО — исполнительный орган.

**Выбор мощности электродвигателей.** Мощность электродвигателей определяется нагрузкой производственных механизмов и режимом их работы.

Если во время рабочего цикла мощность остается постоянной, то режим называют *режимом постоянной нагрузки*, а если она

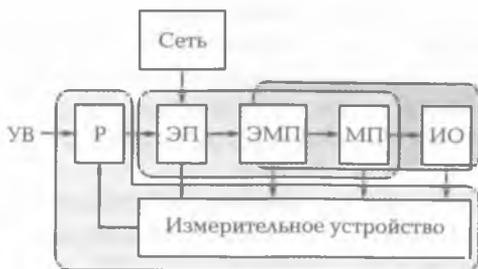


Рис. 8.9. Функциональная схема электропривода

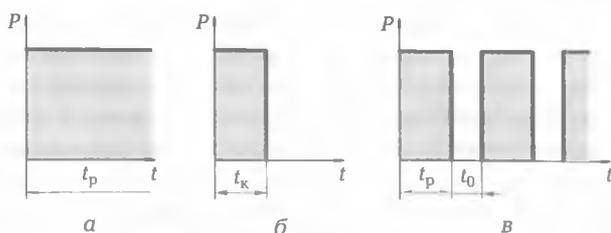


Рис. 8.10. Режимы работы электродвигателей:

а — продолжительный; б — кратковременный; в — повторно-кратковременный

изменяется — **режимом переменной нагрузки**. Графики нагрузки для трех режимов работы при постоянной нагрузке представлены на рис. 8.10, где  $t_p$  — время работы;  $t_k$  — время кратковременной работы;  $t_0$  — время паузы.

В зависимости от характера и продолжительности рабочего цикла установлены три основных режима работы: продолжительный, кратковременный и повторно-кратковременный.

**Продолжительный режим** работы двигателя характеризуется такой длительностью, при котором его температура достигает своего установившегося значения. В таком режиме работают приводы вентиляторов, насосов, преобразовательных установок.

При **кратковременном режиме** двигатель не успевает в рабочий период нагреться до установившейся температуры, а пауза столь длительна, что температура снижается до температуры окружающей среды. Такой режим характерен для приводов шлюзов, вспомогательных механизмов электротермических установок, зажимов колонн металлорежущих станков и др.

**Повторно-кратковременный режим** характеризуется относительной продолжительностью включения.

При повторно-кратковременном режиме двигатель за время работы не успевает нагреться до установившейся температуры, а за время паузы между включениями не успевает остыть до температуры окружающей среды.

**Управление электроприводами.** Управление электроприводом состоит в пуске, останове, изменении направления вращения и регулировании частоты вращения электрических двигателей.

Системы управления электроприводами подразделяются на два вида. К **первому виду** относятся разомкнутые системы, обеспечивающие автоматизацию процессов пуска, торможения, изменения скорости, защиту и т.д. Ко **второму виду** — замкнутые системы управления, в которых используются различные обратные связи: по скоро-

сти, ЭДС, току и т.д. Обратные связи совместно с задающим (управляющим) сигналом позволяют формировать статические и динамические характеристики электроприводов в соответствии с заданными технологическими требованиями. Важным условием обеспечения правильной и непрерывной работы электроприводов является выбор схемы управления. Используют несколько способов управления.

**Ручное управление** осуществляется с непосредственным участием человека, путем использования неавтоматических коммутационных аппаратов (прерывателей, контроллеров и др.).

**Автоматическое управление** выполняется с использованием аппаратов автоматического действия (реле, контакторов и др.). Автоматическое управление облегчает труд людей, повышает производительность труда, позволяет управлять механизмами дистанционно.

Среди аппаратов дистанционного управления электроприводами чаще всего используют **электромагнитные контакторы** и **пускатели**. Пускатели представляют собой сочетание электромагнитного контактора с биметаллическим термическим реле, смонтированными в общей коробке и укомплектованными кнопками управления «Пуск» и «Стоп».

Управлять электроприводами можно и **бесконтактными аппаратами**. Они состоят из магнитных (трансформаторов, дросселей, усилителей), полупроводниковых (диодов, транзисторов, тиристоров и др.) и вспомогательных (резисторов, конденсаторов и др.) элементов. В таких аппаратах нет быстроизнашивающихся механических деталей, они обладают большим быстродействием, но стабильность их работы зависит от температуры.

Цепи с бесконтактными аппаратами сложнее и дороже. Требуется более дорогая и сложная аппаратура настройки и выявления повреждений. Их используют преимущественно в регулируемых приводах при большой частоте включений и в приводах, работающих во взрывоопасной среде.

### **Запомните**

- Если источником механической энергии является электрический двигатель, то машину или механизм приводят в движение с помощью электрического привода. Станки, электрический транспорт, промышленные роботы и манипуляторы приводятся в движение с помощью электропривода.
- Основная функция электропривода — приводить в движение рабочий механизм и изменять его режим работы в соответствии с требованиями технологического процесса.

- Основными составляющими электропривода являются электродвигатель, передаточный механизм и аппаратура управления.
- Выбор вида электропривода и способа управления им зависит от системы электропередачи, режимов работы и механических характеристик объекта (станок, транспортные средства, механизм и др.).
- Если не выдвигаются специальные требования к регулированию частоты вращения, значению пускового момента или пускового тока, то при выборе двигателя необходимо отдавать предпочтение асинхронным двигателям с короткозамкнутым ротором. Они просты по устройству, легко управляемы и надежны в эксплуатации.

## **?** КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Что называется электроприводом? Каковы его основные функции?
2. Какие основные элементы электропривода вы знаете?
3. По каким основным показателям выбирают тип электродвигателя?
4. Какие режимы работы двигателя вам известны?
5. От чего зависит выбор вида электропривода и способа управления?
6. Какие преимущества имеет автоматическое управление электроприводом?

## **T** ТЕМЫ ДОКЛАДОВ И РЕФЕРАТОВ

---

1. Основные функции электропривода и их классификация.
2. Системы управления электроприводом.
3. Электрооборудование электрических подъемно-транспортных средств.
4. Электрооборудование электрического транспорта.
5. Применение электроприводов в работе промышленных роботов и манипуляторов.

## **8.3.** ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

---

### **8.3.1. ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**

К электронагревательным приборам относятся электрические нагревательные плиты, утюги, бойлеры (нагреватели воды), батареи и др. В них источником теплоты является нагревательный эле-

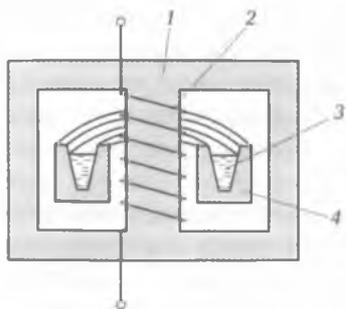


Рис. 8.11. Устройство индукционной печи:

1 — стальной сердечник; 2 — первичная обмотка; 3 — расплавляемый металл; 4 — огнеупорный канал

мент, изготовленный из проволоки с большим сопротивлением, в котором электрическая энергия преобразуется в тепловую.

Для обеспечения безопасной работы нагревательные элементы укладывают в керамическую оболочку и затем в каналы чугунных плит, герметичные трубы, каналы керамических патронов и др.

Обычно приборы выполняют с несколькими нагревателями, что позволяет по ступеням регулировать их мощность с помощью многопозиционных переключателей.

Нагревательными элементами оборудуют также различные типы электропечей, используемых в промышленности для нагрева, плавления, сушки и других целей.

**Индукционные электрические печи.** Такие печи используют для расплавления металлов и получения сплавов. В индукционных печах электрическая энергия преобразуется в тепловую за счет вихревых токов. Печи могут быть выполнены со стальным сердечником и без него. Устройство индукционной печи со стальным сердечником показано на рис. 8.11. Стальной сердечник 1 уменьшает рассеяние магнитного потока и концентрирует его на расплавляемом металле 3. Это своеобразный трансформатор, работающий в режиме короткого замыкания. Первичная обмотка 2 уложена поверх закрытого стального магнитопровода, роль вторичной обмотки выполняет расплавляемый металл 3. Металл помещают в кольцеобразный огнеупорный канал 4, охватывающий первичную обмотку. Таким образом, вторичная обмотка короткозамкнута. При питании первичной обмотки переменным напряжением частотой  $f$  во вторичной обмотке индуцируется ЭДС  $E_2$ , которая для одного канала ( $w_2 = 1$ ) определяется выражением

$$E_2 = 4,44f\Phi_m,$$

где  $\Phi_m$  — максимальный магнитный поток, создаваемый первичной обмоткой.

Под действием  $E_2$  во вторичной обмотке (металле) проходит ток  $I_2$  очень большого значения, что приводит к выделению большого количества теплоты. Металл нагревается до высокой температуры и расплавляется.

**Электродуговые печи.** Источником теплоты в электродуговых печах является *электрическая дуга*. Металл в них нагревается *лучистой энергией дуги*. Вследствие того что в небольшом объеме сосредоточено большое количество теплоты, в дуге возможно получить температуру до 3 000—5 000 °С. Электрооборудование дуговых печей сравнительно сложное. Для их питания используют специальные трансформаторы, рассчитанные выдерживать большие и продолжительные перегрузки. Положение электродов регулируют автоматизированными электроприводами.

**Электрическая сварка.** Сваркой называют способ получения неразъемного соединения деталей. Различают дуговую, контактную, плазменно-дуговую и электронно-лучевую сварку.

**Электродуговой сваркой** получают неразъемные соединения, преимущественно стальные. Для этой цели используют тепловое воздействие на свариваемые детали электрической дуги. Роль одного электрода выполняет свариваемая деталь 3, а другого — специальный электрод 2 (рис. 8.12). В связи с тем что расстояние между электродами невелико, теплота дуги 1 сосредоточена в маленьком объеме. Это приводит к быстрому нагреву и плавлению металла в месте сварного соединения. Электрод предназначен для подачи тока к месту возникновения дуги и для доставки дополнительного материала (металла), необходимого для образования сварного шва.

Дуга возникает при напряжении 50—80 В, для ее поддержания требуется напряжение 25—30 В. Питание дуги может осуществляться постоянным или переменным током. Сварка переменным током экономически более выгодна, дешевле сварочные агрегаты, ниже расходы по их эксплуатации. Однако переменный ток нельзя использовать для сварки цветных металлов и некоторых марок сталей.

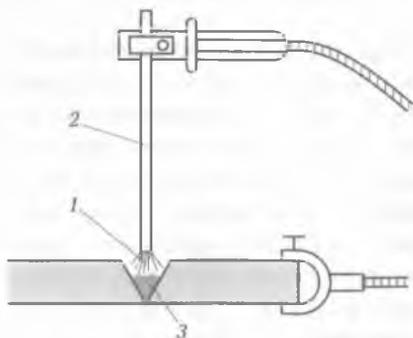


Рис. 8.12. Схема электродуговой сварки:

1 — дуга; 2 — специальный электрод; 3 — свариваемая деталь

**Контактная электросварка** имеет следующие разновидности: стыковая, точечная и роликовая. Точечная и роликовая (шовная) сварка производится на контактных машинах мощными однополярными импульсами тока.

Свариваемые детали устанавливают между электродами контактной машины, плотно сжимают и включают ток. В месте контакта металл расплавляется и образуется сварная точка, при роликовой сварке заготовки устанавливают между роликами. При вращении роликов к ним импульсом подключается ток.

Высококачественная точечная сварка достигается при определенной амплитуде и длительности импульса тока.

Преобразование электрической энергии в тепловую широко используется в быту (утюги, электронагреватели, электрические плиты и др.) и на производстве (индукционные и электродуговые электрические печи, электродуговая, контактная и другие виды сварки).



#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Как обеспечивают безопасность работы нагревательных приборов?
2. В чем состоит суть принципа действия электрической печи?
3. Можно ли проводить электродуговую сварку, используя источник постоянного тока?
4. Какие виды сварки с использованием теплового действия электрического тока вы знаете?

### 8.3.2. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

В металлургии цветных металлов и ряде химических производств широко используются электрохимические процессы, и в первую очередь электролиз, который применяется для рафинирования меди, никеля, свинца, получения алюминия, цинка, магния, водорода, хлора и ряда других химических веществ.

Сущность **электролиза** заключается в выделении из электролита при протекании через него постоянного тока частиц вещества и осаждении их на электродах (этот процесс называется экстракцией) или в переносе веществ с одного электрода через электролит на другой (электролитическое рафинирование).

Электролиз также широко применяется для нанесения металлических покрытий из материалов анода или соединений, раство-

ренных в электролите, на поверхность детали, служащей катодом (хромирование, лужение, никелирование и т. п.). Такой процесс называется **гальваностегией**.

Электрохимические процессы используются для получения металлических копий с изделий, получивших название матриц. Такой процесс называется **гальванопластикой**. Широкое применение гальванопластика получила в полиграфии.

Явление электролиза используется при очистке (травлении) поверхностей деталей от загрязнений путем снятия с них тонкого поверхностного слоя. Объект травления в этом случае служит анодом.

Электрохимические процессы широко используют в цветной металлургии для производства алюминия. Процесс получения алюминия заключается в разложении глинозема  $Al_2O_3$ . При этом на катоде выделяется алюминий, а на аноде — кислород. Однако глинозем имеет высокую температуру плавления ( $2050^\circ C$ ) и не электропроводен, поэтому его растворяют в расплавленном криолите  $Na_3AlFe$ .

Смесь оксида алюминия с криолитом имеет более низкую температуру плавления ( $950^\circ C$ ) и служит электролитом для получения алюминия. Современные электролизеры для получения алюминия работают на постоянном токе при плотности тока на аноде  $7\,000\text{—}10\,000\text{ А/м}^2$ , при дальнейшем увеличении плотности тока усиливаются побочные реакции, которые приводят к увеличению падения напряжения на ванне и увеличению удельного расхода электроэнергии.

Производство алюминия является одним из наиболее энергоемких процессов. Установки промышленного электролиза относятся к крупным потребителям электроэнергии. Они потребляют из сети активную мощность в течение продолжительного времени. Отключения установок очень редки лишь в период ремонта. Пусковые режимы установок характеризуются плавным повышением напряжения и мощности в течение нескольких десятков часов, таким образом, не создаются трудности для системы электроснабжения. Коэффициент мощности установок промышленного электролиза должен быть не ниже 0,92.

Металлические покрытия получают также **вакуумным напылением**. Этим методом можно получать металлические покрытия на немаetalлических изделиях. Вакуумное напыление нашло широкое применение в радиоэлектронной промышленности для производства конденсаторов, интегральных микросхем печатных плат и др.

В электрохимическом производстве с помощью электролиза и электрогальваники преобразуют электрическую энергию в химическую.

1. Что называется электролизом?
2. Чем отличается гальваностегия от гальванопластики?
3. Как с помощью электрохимических процессов получают алюминий?
4. Где применяется вакуумное напыление?

### 8.3.3. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ОСВЕЩЕНИЕ

Электрическое освещение и источники света предназначены для создания световых условий, требуемых для труда и отдыха человека. В последние годы источники света все шире применяются для технологических целей (сушка, облучение сельскохозяйственной продукции, получение химических веществ, в информационной технике и т.д.). На освещение в нашей стране используется более 10% всей производимой электроэнергии.



**Источником света** называют тело, излучающее свет в результате преобразования энергии.

Практически все современные источники света в качестве носителя первичной энергии используют электрический ток и называются **электрическими**. К источникам света относятся устройства с оптическим излучением в видимой части спектра (длина волн 380—780 нм), ультрафиолетовой (10—380 нм) и инфракрасной (780—10 нм).

Источники оптического излучения делятся на тепловые (при нагревании тела накала до высокой температуры) и газоразрядные (при прохождении электрического тока в газах).

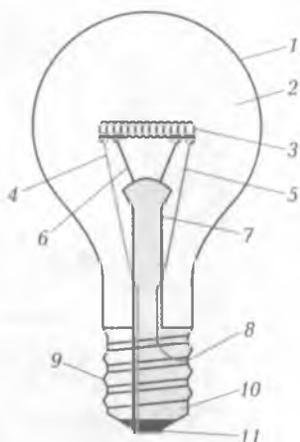
К **тепловым источникам** относятся лампы накаливания, угольные дуги, электрические инфракрасные нагреватели, а к газоразрядным — люминесцентные лампы, дуговые ртутные лампы, лампы дугового высокочастотного и импульсного разряда.

Электрические источники света характеризуются электрическими и световыми параметрами. К **электрическим параметрам** относятся: номинальное напряжение  $U_n$ , номинальная мощность  $P_n$ , номинальный ток лампы  $I_n$ ; к световым — световой поток  $\Phi$ , излучаемый лампой, измеряемый в люменах (лм); световая отдача лампы, стабильность светового потока.

Основной частью **лампы накаливания** (рис. 8.13) является тело накала, нагревание которого при прохождении электрического тока приводит к появлению оптического излучения. В качестве тела накала в настоящее время используется спираль из сплавов на основе вольфрама. Стеклообразная колба *1* изолирует тело накала *3* и электро-

Рис. 8.13. Конструкция современной лампы накаливания:

1 — колба; 2 — полость колбы (вакуумированная или наполненная газом); 3 — тело накала; 4, 5 — электроды (токовые вводы); 6 — крючки — держатели тела накала; 7 — ножка лампы; 8 — внешнее звено токов ввода, предохранитель; 9 — корпус цоколя; 10 — изолятор цоколя (стекло); 11 — контакт доньшка цоколя



ды (токовые вводы) 4, 5 от внешней среды. Из полости колбы отсасывается воздух, и она заполняется инертным газом или смесью газов. Токопроводящие провода припаяны к внешним электродам, которые изолированы друг от друга. Для усиления светоотдачи увеличивается поверхность тела накала, поэтому в большинстве ламп тело накала выполняется в виде нити или спирали из тонкой нити. В некоторых конструкциях ламп накаливания используются отражающие покрытия.

Лампы накаливания просты по устройству и эксплуатации, дешевы и не нуждаются в применении специальной пусковой аппаратуры. Их существенный недостаток — отличие спектра создаваемого света от дневного и малая светоотдача. Средняя продолжительность службы таких ламп около 1 000 ч.

**Люминесцентная лампа** — газоразрядный источник света, в котором видимый свет излучается в основном люминофором, который, в свою очередь, светится под воздействием ультрафиолетового излучения разряда (рис. 8.14). Сам разряд тоже излучает видимый свет, но в значительно меньшей степени.

Световая отдача люминесцентной лампы в несколько раз больше, чем у ламп накаливания аналогичной мощности. Срок службы люминесцентных ламп может в 10 раз превышать срок службы ламп накаливания при условии обеспечения достаточного качества электропитания, балласта и соблюдения ограничений по числу включений и выключений.

Люминесцентные лампы нашли широкое применение в освещении общественных зданий (школ, больниц, офисов и т. д.). Популярность люминесцентных ламп обусловлена их преимуществами:



Рис. 8.14. Различные виды люминесцентных ламп

значительно большей светоотдачей (люминесцентная лампа 20 Вт дает освещенность как 100 Вт лампа накаливания), длительным сроком службы (от 2 000 до 20 000 ч), рассеянным светом, разнообразием оттенков света.

Наиболее целесообразно применять люминесцентные лампы для общего освещения, прежде всего помещений большой площади, в особенности совместно с системами, позволяющими улучшить условия освещения и при этом снизить потребление энергии на 50—83 % и увеличить срок службы ламп. Люминесцентные лампы широко применяются также в местном освещении рабочих мест, световой рекламе, подсветке фасадов. Они нашли применение и в подсветке жидкокристаллических экранов. Плазменные дисплеи также являются разновидностью люминесцентной лампы.

### **!** Запомните

Непосредственное световое излучение трубки очень мало, но электрический разряд в ртутных парах является источником интенсивного ультрафиолетового излучения (невидимого для глаза), которое в слое люминофора преобразуется в видимый свет.

В отличие от лампы накаливания люминесцентная лампа не может быть включена напрямую в электрическую сеть, так как для

зажигания дуги в люминесцентной лампе требуется импульс высокого напряжения и после зажигания лампы ток в ней многократно возрастает. Если его не ограничить, лампа выйдет из строя. Для решения этих проблем применяют специальные устройства — электронные балласты.

Для питания источников света и других потребителей электроэнергии в домах и производственных помещениях сооружают специальные устройства. Они состоят из щитов и линий.

**Электрические щиты** бывают главными, групповыми, этажными и квартирными. В зависимости от их предназначения в них монтируют аппаратуру защиты, управления, измерения и сигнализации.

**Электрические линии** отходят от щитов и бывают питающими, групповыми и выводными.

**Питающие** линии связывают главный щит с внешней электрической сетью или групповыми щитами, **групповые** — связывают групповые щиты непосредственно с приемниками электроэнергии, а **выводные** — служат для подсоединения к контактам и лампам (осветительным устройствам).

На фазных проводниках питающих и групповых линий обязательно устанавливают предохранители. На нулевом проводнике предохранители не устанавливают.

Питание электрических устройств в жилых и производственных зданиях осуществляют от распределительной сети с напряжением 380/220 В.



## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Что называется источником света?
2. В чем состоят преимущества и недостатки ламп накаливания?
3. Какие преимущества имеют люминесцентные лампы?
4. Каков срок службы люминесцентных ламп?



## ТЕМЫ ДОКЛАДОВ И РЕФЕРАТОВ

---

1. Применение электрической энергии в вашей профессии.
2. Установки электронагрева.
3. Установки индукционного нагрева.
4. Электрическая сварка.
5. Использование электрической энергии в сварочном производстве.
6. Электрическое освещение и источники света.

Электрическую энергию применяют как в быту, так и в промышленности. Со временем потребление ее увеличивается, так как активно ведется строительство жилых домов, вводятся новые производственные мощности.

Увеличение расхода электроэнергии создает трудности в электроснабжении в определенные часы суток и в отдельные сезоны года (несмотря на ежегодный ввод в эксплуатацию новых электростанций). Самые большие трудности возникают в осенне-зимнее время, а также в утренние и вечерние часы. Кроме того, для выработки энергии используют невозобновляемые энергетические источники — уголь, нефть, природный газ, которые в перспективе будут исчерпаны. Все это заставляет проводить мероприятия по экономии электрической энергии и эффективному использованию энергетических ресурсов.

Энергосбережение — важная задача по сохранению природных ресурсов.

Снижение потерь **в сети** сводится к использованию энергосберегающих устройств, увеличению значений номиналов проводников (проводов и кабелей), максимальному использованию проводов и кабелей с медной жилой и отслеживанию несанкционированных подключений.

Экономия электроэнергии **в быту** может быть реализована применением электробытовых приборов и осветительных устройств с более высоким КПД, подходящего типа и мощности, путем недопущения работы потребителей вхолостую (лишние включенные лампы, нагревательные электроприборы, телевизоры и др.).

Экономия электроэнергии **в промышленности** сводится к ограничению времени работы электродвигателей и осветительных устройств вхолостую, увеличению нагрузки механизмов и машин до номинальной, замены недогруженных двигателей другими, подходящими по мощности, выборе самого экономичного режима работы трансформаторов, уменьшению их числа при параллельной работе, использованию источников света и осветительных устройств с лучшими энергетическими показателями.

Экономия электроэнергии тесно связана и с перестройкой экономики. Необходимо вовремя заменять устаревшие энергоемкие технологии на новые, более технологичные.

Потери электроэнергии — это бесполезно и безвозвратно потерянные энергетические ресурсы. Сегодня в отличие от прошлых

лет о степени развития и стандарте жизни в любой стране судят не по количеству произведенной электроэнергии на душу населения, а по количеству произведенной продукции на единицу израсходованной электроэнергии или по количеству электроэнергии, расходуемой на единицу национального дохода.



### Запомните

- Экономия означает не ограничение и лишение электроэнергии, а разумное и экономное ее расходование.
- Экономия электроэнергии приводит к снижению себестоимости продукции и дает возможность производить дополнительную продукцию.



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

---

1. Что называется энергосбережением?
2. Какие способы экономия электроэнергии в быту и на промышленных предприятиях вы знаете?
3. Как экономия электроэнергии влияет на развитие производства?