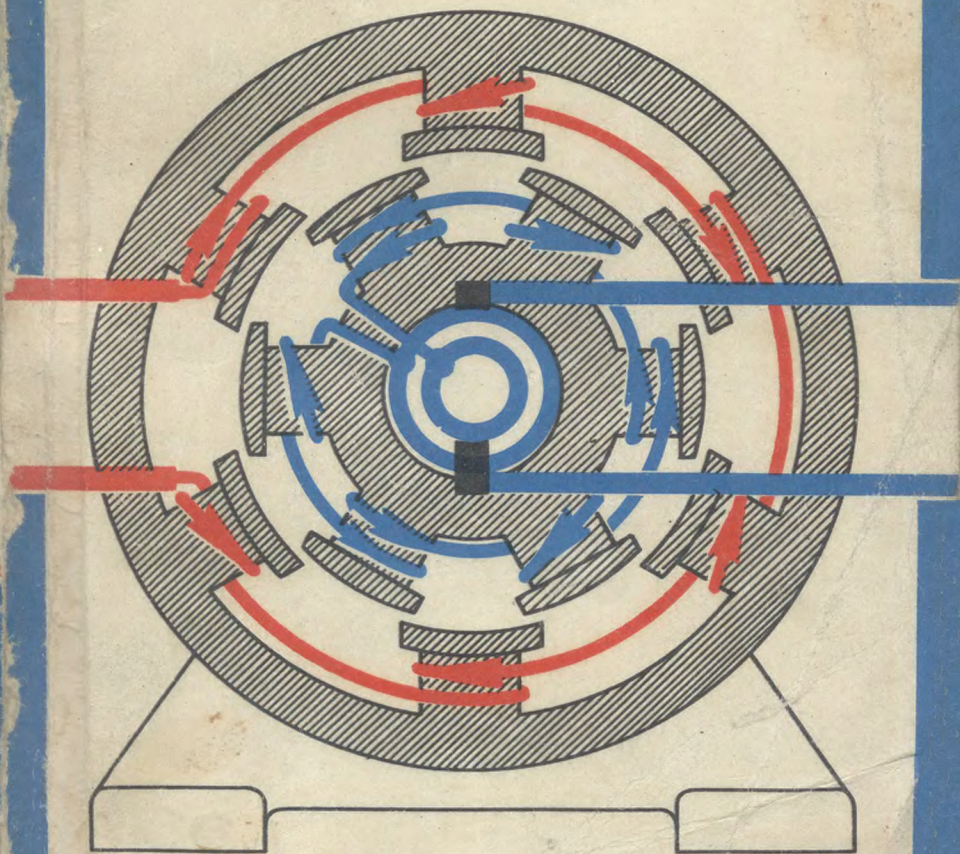


В. Конрад

# ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

кратко  
и наглядно









**WALTER CONRAD**

**ELEKTROTECHNIK  
KURZ UND  
EINPRÄGSAM**

**VEB FACHBUCHVERLAG  
LEIPZIG**



**В. КОНРАД**

# **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА КРАТКО И НАГЛЯДНО**

Перевод с немецкого  
Е.П.Софронова



Ленинград "Энергия"  
Ленинградское отделение 1980



ББК 31.2  
К 64  
УДК 621.3

Конрад В.

К64      Электротехника кратко и наглядно: Пер. с нем. —  
Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1980. — 208 с., ил.

75 к.

В книге рассказывается о значении электротехники в повседневной жизни. Популярно изложены основы знаний, которые необходимы для понимания предмета. Показано, как могут применяться различные физические законы и как создать фундамент, на котором читатель может расширить свои познания.

Книга рассчитана на лиц, не имеющих специального образования, но интересующихся применением электричества в технике, промышленности и быту.

К  $\frac{30306-062}{051(01)-80}$  100—79. 2302000000

ББК-31.2  
6П 2.1



## ВВЕДЕНИЕ

В книге делается попытка рассказать читателю о значении электротехники. Повсюду нас окружают электрические устройства, на каждом шагу мы встречаемся с действием электричества. Миллионы двигателей в промышленности, в средствах сообщения и в домашнем быту вращаются с помощью электричества. Оно освещает жилище человека, предприятия и улицы, а также необходимо для производства разнообразной продукции. Ему обязаны мы наличием службы связи, электронно-счетных машин и тысяч других приборов, с помощью которых мы управляем, измеряем и регулируем. Без электричества мы не имели бы космонавтики, медицинской электроники и даже пылесосов.

Многие народы строят социализм или освобождаются от колониальной эксплуатации. Для них особенно важным является вывод В. И. Ленина: "Коммунизм — это есть советская власть плюс электрификация всей страны".

Если электротехника еще менее десятилетия назад была делом отдельных специалистов, то сегодня едва ли найдется профессия, рабочее место, где бы мы с ней не встретились. Поэтому-то так необходимо знать ее основы.

Эта книга задумана как путеводитель. Здесь предпринята попытка изложить читателю основы знаний, которые необходимы для понимания электротехники. В книге показано, как могут применяться различные физические закономерности, и заложен фундамент, на основе которого читатель затем сможет расширить свои познания.

### Что такое электрический ток?

Когда были построены первые электрические аппараты и машины, о сущности электричества имели еще очень смутное представление. Никто не знал, что такое собственно электрический ток. И лишь в конце XIX в. наука ответила на этот вопрос: электрический ток есть совместное перемещение носителей зарядов — мельчайших электрически заряженных частичек.

Носителями зарядов в электротехнике являются большей частью электроны, подобные электронам на "оболочке" каждого атома. В жидкостях и газах в качестве носителей зарядов при известных обстоятельствах выступают также атомы или группы атомов. Называются они *ионами*.

Перемещающиеся в проводнике электроны производятся не "электронным генератором". Такого нет. Они содержатся в самом проводнике. Атомы вещества, из которого состоит проводник, поставляют электроны, которые могут свободно двигаться между атомами. Если они перемещаются в одном направлении, то по проводнику течет ток.

Свободно движущиеся в металле электроны, следовательно, "транспортируют" электричество. Поэтому их называют *электронами проводимости*. Металлы хорошо проводят электрический ток, так как у них имеется достаточно электронов проводимости. Материалы, у которых имеется много легко подвижных носителей зарядов, называют *проводниками*.

В материалах, у которых нет совсем или очень мало электронов проводимости, не может возникнуть значительный

ток. Такие материалы называют *диэлектриками* (изоляторами). Для электротехники они не менее важны, чем проводники.

Промежуточный широкий класс веществ составляют *полупроводники*, которые в последнее время находят все большее применение. Это материалы, которые проводят электрический ток хуже, чем проводники, но лучше, чем диэлектрики. Но не это в них главное. Прохождение тока через полупроводник осуществляется по совсем особым физическим законам.

В проводнике возникает постоянный ток, если электроны проводимости могут совершать круговую циркуляцию.

Представим себе проволочное кольцо, в котором протекает ток. В кольце равномерно движутся электроны проводимости. Их число существенно не меняется. Если мы выделим отрезок проволочного кольца, то установим, что в нем находится постоянно равное количество электронов проводимости.

Устройство, в котором электроны могут совершать постоянную круговую циркуляцию, назовем *круговым контуром* или электрической цепью (рис. 1). Это важнейшее понятие электротехники. При изготовлении любого электрического аппарата используется круговой контур.

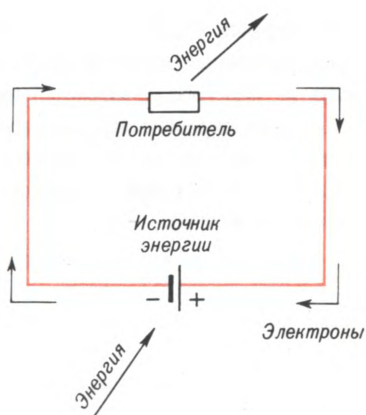


Рис. 1. Контур тока



На практике мы имеем дело не с проволочным кольцом, а с петлями проводника любой формы. Проводник разрывают, как правило, в двух местах: в одном помещают *источник энергии*, который сообщает некоторый импульс энергии электронам проводимости, в другом — *потребитель тока*, в котором этот импульс преобразуется в другую форму энергии, например в тепловую или в механическую энергию двигателя.

Название "потребитель тока" в основе своей ложно, но повсеместно укоренилось. Электрическая энергия не "потребляется", а только преобразуется в другой вид энергии. Точно так же и *источник энергии* контура тока является только приспособлением, в котором электроэнергия переходит из одной формы в другую. Электронный круговой поток в контуре подчинен общеизвестным законам: каждый потребитель тока должен соединяться двумя проводниками с источником электроэнергии — по одному электроны к потребителю "притекают", по другому они "вытекают". Если в каком-либо месте контур разрывается, ток тотчас прерывается, поэтому в любом месте контура можно установить выключатель.

Скорость перемещения электронов проводимости, как установлено в экспериментальных исследованиях, очень мала: она составляет доли миллиметров в секунду. Вместе с тем при разрыве контура или последующем включении тока мгновенно прекращается или возобновляется движение электронов во всем контуре.

На первый взгляд, это кажется странным, но объяснение этому явлению состоит в том, что *импульс движения* от электрона к электрону, который не имеет никакого отношения к скорости перемещения электронов, распространяется очень быстро. Так же и частицы воды в трубе повсюду немедленно приходят в движение независимо от скорости струи, когда открывается кран.

## Важнейшая категория — сила тока

Не ограничиваясь представлением о том, что в цепи течет ток, попытаемся описать процесс также количественно, численно, т. е. обратимся к важнейшей категории электротехники — *силе тока*.

Чтобы оценить мощность течения реки, указывают расход воды в кубических метрах в секунду, например:  $100 \text{ м}^3/\text{с}$  означает, что мимо наблюдателя на берегу реки через ее сечение протекает в каждую секунду  $100 \text{ м}^3$  воды.

Чтобы определить силу электрического тока, поступают подобным же образом: ток считается тем "сильнее", чем больше электронов протекает за единицу времени через избранное для измерения сечение.

Воду измеряют кубическими метрами, так как исключается подсчет молекул воды, протекающих перед наблюдателем. Число отдельных электронов проводимости также невозможно фиксировать, поэтому силу электрического тока измеряют с помощью действия, которое он производит.

Электрический ток выделяет из растворов солей металл, причем выделяемое и легко взвешиваемое количество металла пропорционально силе тока и времени действия тока. Основываясь на этом, можно определить единицу силы тока. Имеется и другой путь. Между двумя проводниками, по которым течет ток, действуют силы притяжения или отталкивания. Они легко измеримы и служат также для определения силы тока.

Единицей силы тока является *ампер* (A), названный так по имени французского физика и математика *Андре Мари Ампера* (1775 — 1836). Дольные и кратные единицы:

$$1 \text{ миллиампер (мА)} = 0,001 \text{ A} = 10^{-3} \text{ A};$$

$$1 \text{ микроампер (μA)} = 0,000001 \text{ A} = 10^{-6} \text{ A};$$

$$1 \text{ килоампер (кA)} = 1000 \text{ A} = 10^3 \text{ A}.$$

Прибор для измерения силы тока называется амперметром.

Для того чтобы составить представление о том, как много движется электронов, установили, что при силе тока в 1 A

через электрический прибор протекает в секунду более  $6 \cdot 10^{18}$  электронов.

**Сила тока (в амперах)  
в технических аппаратах**

Карманный фонарик . . . . .	0,07
Электробритва . . . . .	0,35
Радиоприемник (супер) . . . . .	0,37
Телевизор . . . . .	0,7
Пылесос . . . . .	2
Дуговая лампа прожектора . . . . .	15
Трамвай . . . . .	150
Электросварочный аппарат . . . . .	300
Электрохимическая установка, не менее . . . . .	100 000

Теперь уместно сообщить еще об одном важном свойстве электрического тока: электроны в контуре не могут "сжиматься", так же как не может уменьшаться расстояние между молекулами в потоке воды при обычных условиях. Следствие из этого свойства очень важно: в простой, неразветвленной цепи сила тока во всех точках равновелика.

**Напряжение — причина электрического тока**

Мы знаем, что гнезда штепсельной розетки находятся "под напряжением". Если его нет, то электрический прибор отказывает, хотя и включен в розетку: лампа не горит, радиоприемник молчит. Необходимо на розетку "подать" напряжение, чтобы мог "потечь" электрический ток и "ожили" приборы или аппараты, включенные в сеть. Напряжение является причиной электрического тока. Оно "продавливает" электроны через контур.

На основании наблюдений в электротехнике долго считали, что существует два различных вида электричества, которые называли *положительным* и *отрицательным*. Тела, которые были "положительно заряжены", и тела с "отрицательным

зарядом” притягиваются друг к другу, и при соприкосновении их заряд выравнивается полностью или частично. Тела с зарядом одного знака отталкиваются друг от друга.

Сегодня известно, что только электроны могут относительно свободно передвигаться; их произвольно называли отрицательным электричеством. Положительно заряженные частицы остаются связанными с атомным ядром и не перемещаются через проводник.

Тело, заряженное отрицательно, содержит избыточные электроны; положительно заряженное тело, напротив, не только не приобретает извне дополнительные положительные заряды, но относительно своего ”нормального запаса” теряет электроны, вследствие чего в нем и преобладают положительные заряды. Электрический ток есть процесс выравнивания, при котором электроны перемещаются из области избытка (—) в область недостатка (+).

Избыток электронов, с одной стороны, и недостаток, с другой, всегда присутствуют на зажимах аккумулятора. Если соединить зажимы через потребитель тока, то естественным будет утверждение: электрический ток течет от отрицательного зажима к положительному. Однако во всех учебниках по электротехнике сказано, что ”техническое направление тока” прямо противоположно — от плюса к минусу (рис. 2).

Это кажущееся противоречие обусловлено исторически. Конечно, нет никакого сомнения в том, что электроны движутся от отрицательного зажима к положительному — это известно уже несколько десятилетий. Но когда формулировались



Рис. 2. Направление движения электронов и направление тока, принятое в технике

основные правила и законы электротехники, еще ничего не знали об электронах и их перемещении. Однако необходимо было договориться о направлении тока. Договорились — и потерпели неудачу! Только позднее выяснилось, что электроны перемещаются прямо в противоположном принятому направлении. Чтобы не вносить путаницы и не изменять опять все правила, оставили "фальшивое" направление тока. Сегодня повсеместно применяют "техническое направление тока", и в дальнейшем изложении именно это направление тока имеется в виду.

Ток, который течет, не изменяя направления, называют *постоянным током*, соответствующее напряжение — *напряжением постоянного тока*. Очень часто, однако, встречаются в электротехнике с током, который периодически изменяет свое направление и силу. Он называется *переменным током*, а соответствующее напряжение — *переменным напряжением*. В последующих разделах мы будем иметь дело в первую очередь с постоянным током и напряжением.

В электрической цепи электроны получают импульс к движению от источника напряжения\*. Это может быть батарейка, аккумулятор, элемент солнечной батареи, термоэлемент или чаще всего генератор. Для всех источников общим является следующее: на одном зажиме источника наблюдается избыток электронов, на другом — недостаток. Однако неправильно говорить об "источнике тока". Источник напряжения не порождает тока, а только приводит в движение электроны. В зависимости от вида и конструкции источники сообщают электронам различный по значению импульс движения. Действие сторонних (непотенциальных) сил в источниках тока характеризует *электродвижущая сила* (э. д. с.). Э. д. с. определяет силу тока в цепи при заданном ее сопротивлении. Она действует вдоль всего замкнутого контура. Между произвольно выбранными двумя точками контура действует только часть импульса движения. В этом случае говорят просто о *напряжении*. Единицей напряжения и э. д. с. является *вольт* (В), названный так в честь итальянского ученого Алес-

---

\* В отечественной литературе источник напряжения традиционно принято называть источником тока. (Прим. перев.)



*сандро Вольта* (1745 – 1827). Дольные и кратные единицы:

1 милливольт (мВ) = 0,001 В =  $10^{-3}$  В;

1 микровольт (μВ) = 0,000 001 В =  $10^{-6}$  В;

1 киловольт (кВ) = 1 000 В =  $10^3$  В.

Прибор для измерения напряжений называется вольтметром.

Для исследований применяют напряжения в несколько миллионов вольт. Еще более высокие напряжения наблюдаются при грозах.

Ток может возникнуть только при наличии напряжения, в свою очередь, наличие напряжения не означает возникновения тока. Если штепсельная розетка находится под напряжением 220 В, то ток может возникнуть только тогда, когда через электрический прибор будет замкнута электрическая цепь. При грозе между облаками или между облаками и землей возникает очень высокое напряжение, которое молния может выравнивать, создавая на мгновение ток во много тысяч ампер.

**Напряжение (в вольтах)  
в технических аппаратах**

Антенна радиоприемника, не более . . . . .	0,1
Батарейка карманного фонарика . . . . .	1,5
Автомобильная аккумуляторная батарея . . . . .	6 (12)
Электрическая игрушка, не более . . . . .	24
Телевизионная установка. . . . .	60
Нить лампы накаливания . . . . .	220
Трамвай . . . . .	500
Анод кенотрона. . . . .	15 000
Электропоезд . . . . .	15 000
Линии электропередачи (современные)*, не более . . . . .	525 000

---

\* В последние годы созданы линии электропередачи 1150 кВ переменного тока и 1500 кВ постоянного тока. (*Прим. перев.*)

## Сопротивление "тормозит" ток

Если соединить лампочку тонким проводником с батареей карманного фонарика, то светить она будет тем менее ярко, чем длиннее будет проводник. Амперметр, включенный в цепь, покажет, что сила тока падает с увеличением длины проводника. Только повышением напряжения батарейки можно привести силу тока опять к ее начальному значению.

Из этого следует, что электроны в проводнике преодолевают *сопротивление*. Сопротивление является одним из важнейших понятий в электротехнике. Это явление можно представить в виде особого трения, которое преодолевают электроны, постоянно сталкиваясь с атомами проводника, колеблющимися в узлах кристаллической решетки.

Единицей сопротивления является *ом* (Ом), названный так в честь немецкого физика *Георга Симона Ома* (1787 — 1854). Дольные и кратные единицы:

$$1 \text{ миллиом (мОм)} = 0,001 \text{ Ом} = 10^{-3} \text{ Ом};$$

$$1 \text{ килоом (кОм)} = 1\,000 \text{ Ом} = 10^3 \text{ Ом};$$

$$1 \text{ мегаом (МОм)} = 1\,000\,000 \text{ Ом} = 10^6 \text{ Ом}.$$

Проводник имеет сопротивление 1 Ом, если в нем протекает ток силой в 1 А при напряжении в 1 В.

Простейший опыт показывает, что сопротивление зависит от размера проводника. Оно возрастает с увеличением длины и уменьшается с ростом поперечного сечения проводника. Чем длиннее и чем тоньше проволока, тем больше, следовательно, сопротивление.

При испытании проводников одинаковых размеров, но из различных материалов установили, что сопротивление меняется в зависимости от материала. Серебряная проволока имеет сопротивление меньшее, чем медная, а медная — меньшее, чем алюминиевая.

Каждый материал имеет свое "удельное" сопротивление ( $\rho$ ). Это сопротивление отрезка проводника из данного материала сечением 1 мм<sup>2</sup> и длиной 1 м. Если кратко выразить эти зависимости, то получим формулу для расчета сопротивления проводника (в омах):

$$R = \frac{\rho l}{S}, \quad (1)$$

где  $l$  — длина проводника, м;  $S$  — сечение его,  $\text{мм}^2$ . Преобразовав формулу (1), можно определить удельное сопротивление:  $\rho = \frac{RS}{l}$ .

**Пример.** Сопротивление алюминиевого проводника сечением  $0,5 \text{ мм}^2$  и длиной 500 м получим из расчета ( $\rho$  берем в табл. 1) :

$$R = \frac{0,0286 \cdot 500}{0,5} = \frac{14,3}{0,5} = 28,6 \text{ Ом.} \quad (1a)$$

Для вычисления длины алюминиевого проводника сечением  $1 \text{ мм}^2$  и сопротивлением 1 Ом необходимо преобразовать формулу (1) :

$$l = \frac{RS}{\rho} = \frac{1 \cdot 1}{0,0286} = 34,9 \text{ м.}$$

Электрические проводники должны представлять для тока возможно меньшее сопротивление. Наиболее подходят те, которые изготовлены из материала с меньшим удельным сопротивлением и имеют большое сечение. Это, однако, не всегда осуществимо. Наилучшие электрические проводниковые материалы используются в ограниченных случаях. Их

**Таблица 1**

Материал	Удельное сопротивление $\rho$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м	Удельная проводимость $\gamma$ , м/(Ом·мм <sup>2</sup> )
Серебро	0,016	62,5
Медь	0,01786	56
Алюминий	0,0286	35
Вольфрам	0,055	18
Железо	0,10—0,15	10—7
Олово	0,21	4,8
Никелин	0,43	2,3
Константан	0,50	2,0
Хромоникель	1,1	0,91

применяют там, где они незаменимы. Этим объясняется, к примеру, что в последние десятилетия в электротехнике чаще применяется алюминий, чем более редкая медь.

В последних трех строках приведенной таблицы указаны материалы с исключительно высоким удельным сопротивлением. В электротехнике для многих целей требуются именно такие материалы (см. стр. 35). Их разработано большое количество.

Для расчетов иногда удобнее пользоваться не сопротивлением проводника, а величиной, обратной сопротивлению, — *проводимостью* ( $G$ ):

$$\text{Проводимость} = \frac{1}{\text{Сопротивление}} \quad \text{или} \quad G = \frac{1}{R}.$$

$$\text{Сопротивление} = \frac{1}{\text{Проводимость}} \quad \text{или} \quad R = \frac{1}{G}.$$

Проводимость мала, если велико сопротивление, и наоборот. Единицей проводимости является *сименс* (См), названный так в честь *Вернера фон Сименса* (1816 – 1892):

$$1 \text{ См} = \frac{1}{1 \text{ Ом}}.$$

Под "удельной проводимостью" материала понимают величину, обратную его удельному сопротивлению. Преимущество численного выражения удельной проводимости состоит в том, что оно указывает, сколько метров проволоки из соответствующего материала сечением  $1 \text{ мм}^2$  следует взять, чтобы сопротивление ее было равно  $1 \text{ Ом}$ .

Чтобы определить значения удельного сопротивления и удельной проводимости при  $20^\circ \text{C}$ , необходимо учесть важное правило: сопротивление зависит от температуры. Для металлов оно увеличивается с повышением температуры: атомы проводника колеблются тем сильнее, чем выше его температура, поэтому сопротивление атомов движению электронов всегда больше при более высокой температуре.

Непосредственно после включения ток всегда намного больше, чем установившийся затем рабочий ток, так как протекает он по аппаратам, когда проводники еще "холодные". Лампа накаливания, например, в момент включения

потребляет ток, во много раз превосходящий ее нормальный рабочий ток.

Полупроводниковые материалы ведут себя совсем наоборот: их сопротивление падает с повышением температуры. Сопротивление так называемых *термисторов* поэтому имеет наибольшее значение в момент включения тока, а затем оно падает при постепенном нагревании резистора от тока или от внешних воздействий.

*Позисторы* имеют узкую температурную область с резко возрастающим сопротивлением, в то время как сопротивление так называемых *варисторов* изменяется в зависимости от напряжения, подаваемого на резистор. Эти особые виды резисторов находят в последнее время широкое применение в измерительной технике, в схемах защиты и стабилизации, как и во многих устройствах техники управления и регулирования.

### Закон Ома связывает основные величины

Основные величины — напряжение, сила тока и сопротивление в электрическом контуре — не независимы друг от друга. Чтобы понять их взаимозависимость, воспользуемся устройством, изображенным на рис. 3. Источник тока выбирается так, чтобы его напряжение могло изменяться, но независимо от силы протекающего тока (на стр. 26 объяснено, как важно это условие).

Схема указывает нам, кроме того, на важное правило: амперметр должен включаться всегда последовательно с

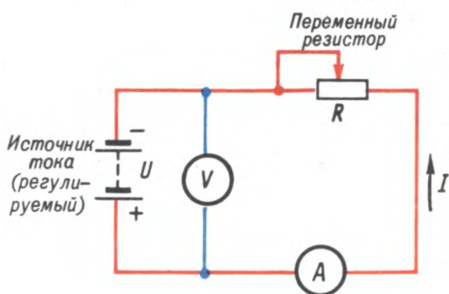


Рис. 3. Опытная установка, иллюстрирующая закон Ома

потребителем, вольтметр — наоборот, параллельно с потребителем (сравни стр. 20).

Устанавливаем на резисторе определенное сопротивление, затем изменяем напряжение. Замечаем, что любое изменение напряжения вызывает изменение силы тока, которое пропорционально изменению напряжения. Удвоение напряжения означает удвоение и силы тока, увеличение напряжения втрое утраивает силу тока и т. д.

Если изменить сопротивление при неизменном напряжении, изменится также и сила тока. Изменение силы тока обратно пропорционально изменению сопротивления: удвоение сопротивления уменьшает силу тока до половины, утроение сопротивления снижает силу тока до трети.

*Георгу Симону Ому* принадлежит заслуга открытия этих зависимостей. В его честь названа единица электрического сопротивления, а его именем — закон:

$$\text{Сила тока} = \frac{\text{Напряжение}}{\text{Сопротивление}} \quad \text{или}$$

$$I = \frac{U}{R}, \quad (2)$$

или

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

Если даны два основных параметра, то третий можно рассчитать с помощью этого закона.

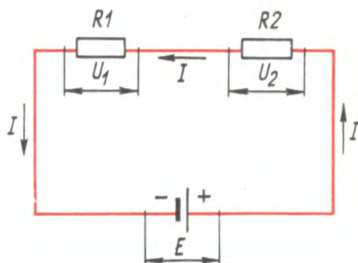
**Пример.** Какой ток потечет через электронагреватель сопротивлением 50 Ом при напряжении 220 В? В соответствии с формулой (2)

$$I = \frac{220}{50} = 4,4 \text{ A.}$$

Какое сопротивление имеет лампочка с заводскими данными 3,5 В, 0,2 А? Преобразуя формулу (2), получаем

$$R = \frac{U}{I} = \frac{3,5}{0,2} = 17,5 \text{ Ом.}$$

Рис. 4. Напряжение и сила тока при последовательном включении резисторов



Через резистор сопротивлением 250 Ом протекает ток 0,1 А. Какое напряжение приложено к резистору? Из формулы (2) имеем

$$U = IR = 0,1 \cdot 250 = 25 \text{ В.}$$

Закон Ома справедлив не только тогда, когда мы рассматриваем всю электрическую цепь. Можно им пользоваться и для части цепи.

Как распределится, например, э. д. с.  $E$ , если в цепь включены последовательно друг за другом (рис. 4) два резистора  $R1$  и  $R2$  (сопротивлением проводников и источника питания пренебрегаем)? Известно, что сила тока в неразветвленной цепи везде одинакова. В нашем случае ток  $I$  должен протекать через оба резистора последовательно. При этом необходимый импульс движению обеспечивает э. д. с.  $E$ . По закону Ома

$$I = \frac{E}{R_1 + R_2}.$$

Часть напряжения, которую обозначим  $U_1$ , "продавливает" электроны через резистор  $R1$ ; другая,  $U_2$ , подобную задачу выполняет для  $R2$ . Если мы для этих напряжений напомним закон Ома, то получим:

$$U_1 = IR_1; \quad U_2 = IR_2$$

Кроме того,

$$E = U_1 + U_2.$$



**Пример.** При  $E = 24 \text{ В}$ ,  $R_1 = 80 \text{ Ом}$  и  $R_2 = 40 \text{ Ом}$  получаем:

$$I = \frac{24}{80 + 40} = 0,2 \text{ А};$$

$$U_1 = 0,2 \cdot 80 = 16 \text{ В}; \quad U_2 = 0,2 \cdot 40 = 8 \text{ В};$$

$$E = U_1 + U_2, \quad \text{т. е. } 24 \text{ В} = 16 \text{ В} + 8 \text{ В}.$$

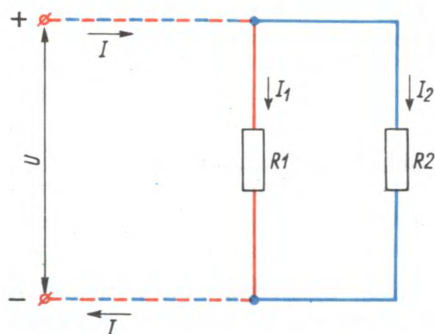
Последовательно включенные резисторы используются как *делители напряжения*. Часто случается, что рабочее напряжение потребителя электроэнергии меньше, чем имеющееся в распоряжении. Если в этом случае потребителя соединяют непосредственно с источником тока, то он нагружается сверх меры и при определенных условиях разрушается. Однако излишнее напряжение можно "уничтожить", используя падение напряжения на специально подключенном резисторе.

**Пример.** Лампа (5 В; 0,2 А) должна питаться от аккумуляторной батареи, имеющей напряжение 12 В. Прямое подключение исключается: лампа перегорит. Чтобы этого не случилось, необходимо в цепь лампы включить резистор, у которого "падение напряжения" составит 7 В, когда ток потечет через лампу. Значение сопротивления резистора можно определить по закону Ома:

$$R = \frac{7}{0,2} = 35 \text{ Ом}.$$

Подобный метод можно использовать также при большем числе резисторов. Например, новогодние елочные электрические гирлянды составлены из большого числа последовательно включенных лампочек низкого рабочего напряжения, но при этом обязательно выполняется условие, чтобы сумма их напряжений равнялась напряжению сети. В этом случае предполагается, что все лампочки предназначены для одинаковой силы тока, но могут иметь различное рабочее напряжение при условии, что сумма отдельных напряжений равна напряжению цепи питания. Этим объясняется рекомендация на стр. 18 о том, что если хотят измерить напряжение у потребителя,

Рис. 5. Напряжение и сила тока при параллельном включении резисторов



необходимо измерительный прибор (вольтметр) присоединить к выводам этого потребителя. При этом через вольтметр также потечет ток. Его сила зависит от сопротивления измерительного прибора и от напряжения между зажимами. Измеритель напряжения в сущности является "калиброванным" измерителем тока (одно исключение рассматривается на стр. 63). Если сопротивление измерительного прибора выбирают достаточно большим относительно сопротивления потребителя, то ток через этот прибор могут поддерживать пренебрежимо малым. При этом возникает общий и важный вопрос: что произойдет, если в цепь параллельно включены (рис. 5) два резистора? Естественно, на обоих резисторах напряжение  $U$  одинаково, в то время как ток проводимости  $I$  делится на два частичных тока  $I_1$  и  $I_2$ . Сила вытекающего из источника тока равна силе обратно притекающего тока, что выполняется при условии:

$$I = I_1 + I_2.$$

Эта зависимость распространяется на случаи параллельного включения любого количества резисторов и составляет содержание закона, установленного Робертом Кирхгофом (1824 – 1887):

*Сумма токов в ветвях цепи равна току всей цепи.*

Если воспользуемся законом Ома, то можем представить частичные токи в виде:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}.$$

Общий ток, следовательно,

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}.$$

Можно представить себе, что напряжение  $U$  "гонит" ток  $I$  через резистор  $R$ , значение сопротивления которого соответствует сопротивлению параллельно включенных резисторов  $R_1$  и  $R_2$ . Сопротивление этого резистора  $R$  легко рассчитать, если в последней формуле заменить  $I$  выражением  $U/R$ , полученным из закона Ома:

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}.$$

Если теперь поделить обе части равенства на  $U$ , то получим:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Приведя выражение к общему знаменателю и преобразовав его, получим формулу для расчета сопротивления, замещающего сопротивление двух параллельно включенных резисторов:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

**Пример.** Параллельное включение резисторов сопротивлением 500 и 1000 Ом дает

$$R = \frac{500 \cdot 1000}{500 + 1000} = 333 \text{ Ом}.$$

Формула

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

может быть записана проще, если ввести в нее вместо сопротивления величину, ему обратную, — проводимость:

$$G = G_1 + G_2.$$

Точно так же при параллельном включении любого количества резисторов складываются их проводимости:

$$G = G_1 + G_2 + \dots$$

Параллельное включение резисторов применяется повсеместно. Параллельно включаются в сеть, например, бытовые электрические приборы (лампы, холодильники, радиоприемники) и находятся под одинаковым напряжением. Электрический счетчик и предохранители находятся под общим током, который складывается из отдельных частичных токов электропотребителей. Можно — еще одно преимущество этого вида соединения — включать и отключать отдельные потребители тока без помех для других.

### **Электродвижущая сила (э. д. с.) и напряжение на зажимах**

Каждый источник тока характеризуется его электродвижущей силой. Однако если подсоединить вольтметр к выводам источника, от которого отбирается ток, то прибор всегда покажет напряжение, меньшее, чем э. д. с.

Так, например, э. д. с. плоской батарейки карманного фонарика составляет 4,5 В; если лампочка горит, то измерение на зажимах батарейки дает только 3,5 В.

Естественно, напряжение не "исчезает". До сих пор было оставлено без внимания то, что источник тока сам обладает известным сопротивлением. Его называют "внутренним сопротивлением"  $R_{\text{и}}$ . Это сопротивление электроны должны преодолевать в их постоянном круговороте, а для этого они нуждаются в импульсе движения, т.е. в э. д. с. Напряжение, измеряемое на зажимах источника тока (напряжение на зажимах), меньше э. д. с. на значение напряжения, приложенного к  $R_{\text{и}}$  ("внутреннее падение напряжения") :

*Напряжение на зажимах = э. д. с. — внутреннее падение напряжения.*

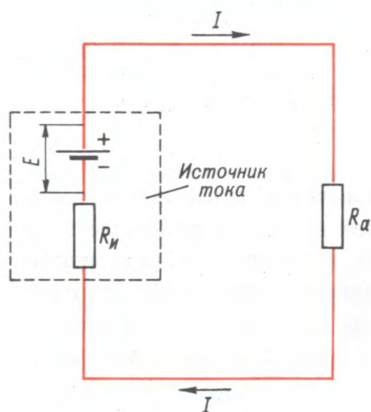


Рис. 6. Эквивалентная схема источника тока

Чтобы иметь возможность учитывать при расчетах внутреннее сопротивление источника тока, мысленно последовательно присоединяют резистор  $R_{и}$  к источнику тока с э. д. с.  $E$ , но без внутреннего сопротивления (рис. 6).

С помощью такой "эквивалентной" схемы и закона Ома можно определять и падение напряжения на резисторе  $R_{и}$ .

**Пример.** Предположим, что потребитель тока  $R_a$  сопротивлением 100 Ом будет присоединен к источнику тока с э. д. с.  $E = 60$  В и внутренним сопротивлением  $R_{и} = 5$  Ом. Каков будет ток в цепи? Чему равно напряжение на зажимах источника тока? Ток должен последовательно протекать через резисторы  $R_{и}$  и  $R_a$ . Следовательно:

$$I = \frac{E}{R_{и} + R_a} = \frac{60}{105} = 0,571 \text{ А.}$$

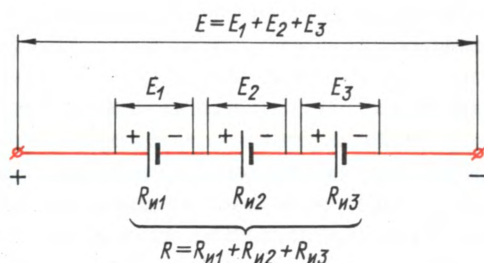
Чтобы рассчитать внутреннее падение напряжения, запишем закон Ома для  $R_{и}$ :

$$U_1 = I R_{и} = 0,571 \cdot 5 = 2,86 \text{ В.}$$

Теперь получаем и напряжение на зажимах:

$$60 - 2,86 = 57,14 \text{ В.}$$

Рис. 7. Последовательное включение источников тока



Если источник тока не нагружен, то внутреннего падения напряжения не наблюдается; тогда ток не течет. В этом случае при "холостом ходе", напряжение на зажимах и э. д. с. совпадают.

Если сопротивление внешней цепи пренебрежимо мало, то сила тока определяется исключительно внутренним сопротивлением источника. В этом случае ток (его называют током короткого замыкания) достигает очень большой силы. Большинство источников при токах короткого замыкания разрушается.

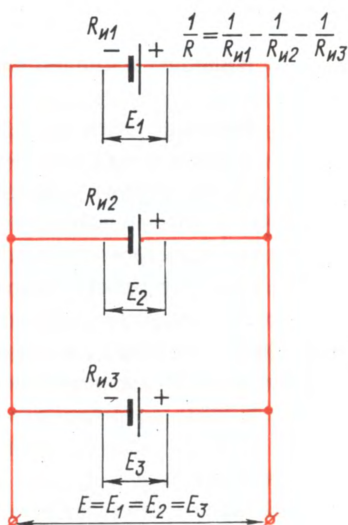


Рис. 8. Параллельное включение источников тока

Когда напряжения одного источника недостаточно, включают последовательно несколько источников, соединяя положительный полюс одного с отрицательным полюсом последующего (рис. 7). При этом складываются э. д. с. и внутренние сопротивления источников, падение напряжения внутри которых быстро возрастает с ростом силы тока. Поэтому последовательное включение предпочитают применять там, где требуется сравнительно малая сила тока от источника.

При параллельном включении источников тока соединяются друг с другом все одноименные зажимы (рис. 8). Внутренние сопротивления отдельных источников включены параллельно, общее сопротивление такой "батареи" поэтому очень мало.

Ее напряжение соответствует напряжению отдельного источника (полагаем, что все источники имеют равную э.д.с.). Такие батареи могут отдавать большой силы ток без существенного снижения напряжения на зажимах.

Наконец, можно комбинировать последовательное и параллельное включения.

## РАБОТА, МОЩНОСТЬ, ЭЛЕКТРОНАГРЕВ

### Киловатт и киловатт-час

Большое значение электроэнергия приобрела также в связи с тем, что она сравнительно легко преобразуется в другие формы энергии: в механическую (двигатели), тепловую (многочисленные электронагревательные приборы), в энергию электромагнитных волн (радио и телевидение).

Механическая работа, которую совершает двигатель, теплота, которую выделяет спираль электрокипятильника или другого прибора, вполне измеримы. От каких же электрических величин зависит совершаемая работа?

Чем больше потребителей тока (электролампы, двигатели и т. д.) и чем дольше они включены, тем больше электроэнергии преобразуется в другую форму энергии. При увеличении количества потребителей тока сила тока также увеличивается,

поскольку обычно потребители тока включаются параллельно. Произведенная электрическая работа возрастает, следовательно, с увеличением силы тока и времени.

Но влияет еще и третья величина. Две параллельно включенные электролампы потребляют двойную энергию, по сравнению с одной лампой, и двойной, естественно, ток. Можно получить подобный результат и в том случае, если лампы включить последовательно и приложить двойное напряжение. Электрическая работа зависит, следовательно, также и от напряжения. Если подытожить эти рассуждения, можно получить для электрической работы  $W$  следующую формулу:

$$W = UIt.$$

Здесь  $U$  — напряжение,  $I$  — сила тока и  $t$  — время.

Прежде чем установить единицу работы, выясним одно обстоятельство. Под "мощностью"  $P$  понимают работу, совершаемую за определенное время. Таким образом,  $P = W/t$ . Если теперь вместо  $W$  подставить выражение для электрической работы, то  $P = UIt/t$ ,

$$P = UI. \quad (3)$$

Мощность электрической установки в простейшем случае, таким образом, — произведение напряжения и силы тока. Напряжение в системе СИ выражается в вольтах, сила тока — в амперах. Произведение вольта на ампер называют *ваттом* (Вт) в память о *Джемсе Уатте* (1736 — 1819). Уравнение единиц выглядит так:

$$1 \text{ Вт} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А}.$$

**Пример.** Если проводники квартиры защищены предохранителями, рассчитанными на ток 6 А, то можно одновременно включать приборы общей мощностью не свыше

$$P = 220 \cdot 6 = 1320 \text{ Вт}.$$



Дольные и кратные единицы мощности:

1 милливатт (мВт) = 0,001 Вт =  $10^{-3}$  Вт;

1 киловатт (кВт) = 1 000 Вт =  $10^3$  Вт;

1 мегаватт (МВт) = 1 000 000 Вт =  $10^6$  Вт.

Можно записать выражение для мощности и в другом виде. Если в формуле (3) заменить  $U$  (в соответствии с законом Ома) величиной  $IR$ , то получим

$$P = I^2 R.$$

Мощность потребителей тока возрастает, следовательно, пропорционально квадрату силы тока. Мы будем часто возвращаться к этому важному соотношению.

**Мощность (в киловаттах), потребляемая  
электроприборами и устройствами**

Карманный фонарик . . . . .	0,001
Радиоприемник (супер) . . . . .	0,08
Телевизор . . . . .	0,15
Рефлектор . . . . .	0,5
Электроплита . . . . .	4,0
Электролокомотив . . . . .	4 000
Сталеплавильная электропечь . .	10 000
Печь для плавки карбида . . . . .	30 000

**Вырабатываемая мощность  
(в киловаттах)**

Мощный генератор . . . . .	800 000
Братская гидростанция . . . . .	4 500 000

Если вернуться к формуле для электрической работы ( $W = UI t$ ), то увидим, что она представляет собой произведение электрической мощности ( $P = UI$ ) и времени ( $t$ ), в течение которого эта мощность действует. Если время выразить в часах (или секундах), то соответственно получим внесистемную единицу работы "ватт-час" (Вт·ч) [или ватт-секунду (Вт·с)]:

1 (Вт·с) = 1 Вт · 1 с;    1 Вт·ч = 1 Вт · 1 ч;

1 Вт·ч = 3 600 Вт·с.

Ватт-час (или ватт-секунда) являются мелкими единицами работы. Поэтому расчеты ведут чаще в киловатт-часах (кВт·ч) :

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 1000 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3\,600\,000 \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

Почти на всех электрических приборах, которые используются в повседневной жизни, указывается их мощность. Это дает возможность подсчитать стоимость использованной каждым прибором энергии.

**Пример.** Сколько стоит один час работы телевизора мощностью 150 Вт?

За час потребляется 150 Вт·ч. Поскольку за киловатт-час платят восемь пфеннингов, то 1 Вт·ч стоит

$$\frac{8}{1000} \text{ пф}, \text{ а } 150 \text{ Вт} \cdot \text{ч} \text{ стоят } \frac{8 \cdot 150}{1000} \text{ пф} = 1,2 \text{ пф}^*.$$

Отсюда видно, как дешева электроэнергия. Это станет еще яснее, если произвести пересчет от непривычных для большинства читателей электрических единиц в механические ( в системе СИ) :  $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3\,670\,000 \text{ кгс} \cdot \text{м} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ ;  $1 \text{ кВт} = 102 \frac{\text{кгс} \cdot \text{м}}{\text{с}}$  ( $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3\,600\,000 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ,  $1 \text{ кВт} = 1000 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{с}}$ ).

Если пренебречь потерями энергии, то энергия в 1 киловатт-час может поднять массу в 367 кг на высоту 1000 м. 1 кВт достаточно, чтобы поднять 102 кг за 1 с на 1 м.

Как и в любой машине, в каждом электрическом устройстве имеются потери. Они возникают из-за того, что часть электрической энергии преобразуется в другие формы, которые для данного случая нежелательны. У электродвигателей часть полезной мощности расходуется на преодоление трения; электрическая лампочка излучает не только свет, но и теплоту. Поэтому механическая мощность электродвигателя ("полезная мощность") меньше, чем электрическая мощность, которую он потребляет. Чтобы численно представить отношение между указанной номинальной мощностью и выдаваемой полезной мощностью (эффективной мощностью),

---

\* В СССР киловатт-час электрической энергии стоит 4 коп., и час работы телевизора обходится в 0,6 коп. (Прим. перев.)

используют понятие "коэффициент полезного действия":

$$\text{К. п. д.} = \frac{\text{Эффективная мощность}}{\text{Номинальная мощность}} \quad \text{или} \quad \eta = \frac{P_{\text{эф}}}{P_{\text{ном}}}.$$

Здесь эффективная и номинальная мощности измеряются в одинаковых единицах. Для к. п. д. получают численное значение, которое выражается в процентах. Так как потерь не избежать, то  $P_{\text{ном}}$  всегда больше, чем  $P_{\text{эф}}$ . Поэтому к. п. д. никогда не может достигнуть значения 1 (100%) или превзойти его.

Чем меньше потери, тем выше к. п. д. прибора или установки и тем больше полезная мощность при одинаковой номинальной мощности. Снижение потерь энергии и мощности является проблемой, которой ученые и инженеры во всех странах уделяют большое внимание.

**Пример.** В крупном цехе установлено 500 двигателей с полезной мощностью 5 кВт каждый и с к. п. д. 0,75 (75%). Следовательно, общая полезная мощность двигателей равна 2500 кВт. Они берут из сети мощность

$$P_{\text{ном}} = \frac{P_{\text{эф}}}{\eta} = \frac{2500}{0,75} = 3330 \text{ кВт.}$$

Хорошо, если улучшением конструкции двигателей удастся повысить к. п. д. до 0,82 (82%). Тогда можно при неизменной номинальной мощности получить эффективную мощность

$$P_{\text{эф}} = P_{\text{ном}} \cdot \eta = 3330 \cdot 0,82 = 2730 \text{ кВт.}$$

Итак, при одинаковой номинальной мощности можно повышением к. п. д. как бы дополнительно установить в цехе почти пятьдесят двигателей.

Можно еще добавить, что к. п. д. электрических приборов и устройств достигает весьма высоких значений и многие электрические приборы и машины (например, двигатели, генераторы, выпрямители и трансформаторы) имеют к. п. д., близкий к 90% и выше.

## Теплота — от электричества

Сопротивление проводника объясняется соударениями электронов проводимости с атомами проводника. При этих соударениях часть энергии электронов переходит к атомам проводника. Вследствие этого атомы начинают колебаться. Этот процесс подобен тому, как бильярдным шаром разбивают "пирамиду": он отдает свою энергию движения остальным шарам, и они разлетаются. Повышение температуры в проводнике указывает на усилившиеся колебания атомов.

Любой материал, через который протекает ток, нагревается. При любом токе часть электроэнергии преобразуется в теплоту. Изменение температуры проводника обычно нежелательно, так как означает потери энергии, и даже может явиться причиной опасности. Но, с другой стороны, производимая током теплота часто приносит и пользу. Существует такая отрасль электротехники, как электротермия, которая использует электрическую энергию для нагрева и расплавления материалов и изделий и имеет значительные преимущества:

- 1) может применяться везде, где имеется электроэнергия;
- 2) не требует громоздкого транспорта, не дает золы и шлака, не загрязняет дымом атмосферу.

В отличие от печей и других устройств, в которых теплоту получают сжиганием топлива, электротермические устройства имеют высокий к. п. д.

Поступление теплоты при таком производстве может легко регулироваться без большой инерции. Автоматические регуляторы температуры устроены особенно просто, если используют для получения теплоты электроэнергию.

Прежде чем рассматривать применение электротермических устройств, мы должны изучить соотношения энергетических единиц в электро- и теплотехнике. Экспериментальное определение этих численных соотношений не представляет большой трудности. Воспользуемся сосудом, в котором находится точно взвешенное количество воды (рис. 9). Сосуд должен быть устроен так, чтобы возможно меньшее количество теплоты отдавалось наружу, т. е. он должен быть своего

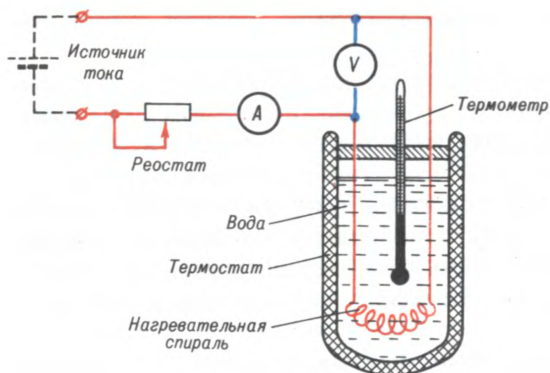


Рис. 9. Опытная установка для определения количества теплоты, производимой электрическим током

рода термосом. В сосуд помещают термометр и нагревательную спираль, которая соединяется с источником тока. Напряжение, подаваемое на спираль, измеряется вольтметром, силу тока указывает амперметр. Для опыта необходимы также часы. Кроме того, в цепь включают реостат, с помощью которого изменяют ток нагрева или поддерживают его на заданном значении. Измерительные приборы позволяют точно определять количество электроэнергии, потребляемой спиралью. Эта энергия полностью преобразуется в теплоту и передается воде в опытном сосуде.

Если принять, что сам сосуд не поглощает и не рассеивает теплоты (или что эти потери заранее определены и, следовательно, известны), то можно легко рассчитать по повышению температуры воды, сколько джоулей (калорий) передано содержимому сосуда. Если сравнить этот результат с количеством израсходованной электроэнергии, то получим искомое численное соотношение между единицами:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Вт} \cdot \text{с} &= 0,239 \text{ кал} = 1 \text{ Дж}; \\ 1 \text{ кал} &= 4,1868 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 4,1868 \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Если имеют дело с большими количествами теплоты и электроэнергии, то расчеты ведут обычно с округленными значениями:

$$1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 860 \text{ ккал} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

**Пример.** Какое количество теплоты отдаст 500-ваттный рефлектор за 8 ч работы?

Потребленная электрическая энергия

$$W = Pt = 500 \cdot 8 = 4000 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 4 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Отсюда следует, что выработанная теплота

$$Q = 4 \cdot 860 = 3440 \text{ ккал} = 14,4 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Так как количество теплоты в 1 ккал (4187 Дж) нагревает 1 л воды на один градус, то выделенная рефлектором теплота нагреет 100 л ( $\text{дм}^3$  или  $10^{-3} \text{ м}^3$ ) воды примерно на  $34^\circ\text{C}$ .

Количество теплоты может рассчитываться также непосредственно по формуле для электрической работы. Для этого необходимо только ввести коэффициент пересчета. Электрическая работа  $W = UIt$  соответствует выраженному в калориях количеству теплоты

$$Q = 0,239 W.$$

а следовательно,

$$Q = 0,239 UIt.$$

**Пример.** Сколько теплоты отдаст за 1 ч утюг, рассчитанный на напряжение 110 В, через который протекает ток в 3,8 А? Получим

$$Q = 0,239 \cdot 110 \cdot 3,8 \cdot 3600 \approx 360\,000 \text{ кал} \approx 1,5 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Преимущества электротермии настолько очевидны, что она нашла широкое применение во многих отраслях промышленности. Кто хоть однажды наблюдал в зимний день висящее над городом облако дыма и чада, кто изо дня в день отправлялся в подвал за топливом, а потом выносил золу, тот неизбежно задавался вопросом, почему не устранят эти неразумные методы обогрева в пользу электрической энергии. Но многие, быть может, еще не знают, что для теплофикации требуется прокладка больших сооружений из труб, а в новых жилых блоках необходимо прокладывать энергетические кабели для освещения, для двигателей водоснабжения, для кухонных электроплит и отопления.

Но главное — нет еще основы, чтобы полностью электрифицировать хотя бы один город или одно село где-либо в мире: электроэнергия везде является дефицитом. Потребность в электроэнергии за последние десятилетия так быстро возрастает, что нигде ее нет в достатке и тем более в избытке. Поэтому превращение электроэнергии в теплоту для бытовых целей пока остается ограниченным, в то время как получение теплоты для развития различных отраслей промышленности таких ограничений не имеет.

Однако при изучении электротермии следует принимать во внимание не только потребителя. Можно получать из одного киловатт-часа  $3,6 \cdot 10^6$  Дж (860 ккал) и на крупных электротермических установках, кроме того, добиваться очень низких потерь. Однако на электростанциях, получающих электрическую энергию от сжигания угля, нефти или газа, производят один киловатт-час далеко не из  $3,6 \cdot 10^6$  Дж (860 ккал). На современных тепловых электростанциях для этого необходимо около  $8,4 \cdot 10^6$  Дж (2000 ккал). К. п. д. при выработке энергии, следовательно, низок, что объясняется физическими законами, которые здесь не рассматриваются и которые не сулят серьезного улучшения обычным тепловым станциям.

Только термоядерные мощные электростанции (см. стр. 192) или другие источники энергии (например, геотермальная или солнечная энергия) изменяют фундаментально энергетическую ситуацию в мире и дадут нам в распоряжение такой избыток энергии, что ни один технический проект не будет отклонен из-за потребности в больших количествах электроэнергии.

### Электроэнергия в быту

Начнем с незаметного, но вместе с тем важнейшего применения электротермии. Речь идет о плавком предохранителе, который "следит" за тем, чтобы в нашем жилище не возникало опасности из-за перегрузки в осветительной проводке, из-за неисправности электрических приборов или из-за короткого замыкания.

Если повышать силу тока в проводнике, то увеличивается количество выделяемой теплоты, а следовательно, возрастает и температура. Проводник начинает раскаляться и наконец расплавляется — течение тока прекращается. Таков принцип действия плавкого предохранителя.

Внутри фарфорового корпуса, заполненного песком, проходит тонкая проволока. Ее параметры рассчитаны так, что при определенной силе тока, например при 6 А, она расплавляется. Проволока заканчивается двумя контактами. Одновременно с ее расплавлением от торца предохранителя отпадает цветная пластинка. "Сгоревший" предохранитель сразу узнают по отсутствию этой пластинки.

Предохранители включаются так, чтобы через них протекал общий ток сети квартиры. "Номинальная сила тока" предохранителя согласуется с допустимой наибольшей силой тока в "защищаемых" проводниках. Ни в коем случае нельзя применять предохранитель на ток выше номинального. В таком случае в сети может возникнуть опасной силы ток и безопасность будет нарушена. Чтобы не допустить включения предохранителей, рассчитанных на ток выше номинального, основания предохранителей делают разных диаметров. Каждому диаметру соответствует на щите предохранителей отверстие точно под предохранитель заданного значения тока. Каждому значению номинального тока соответствует определенный размер, и включение предохранителя на большую силу тока невозможно.

Плавкие предохранители однократного действия при перегрузке приходят в негодность и должны заменяться. Поэтому были разработаны различные типы предохранительных автоматов, которые, разрывая цепь при перегрузке или коротком замыкании, могут вновь автоматически включать ее после устранения причины отключения (см. стр. 88).

Большинство бытовых электронагревательных приборов очень мало различается по принципу действия. Теплоту "производит" так называемый *электронагреватель* из уложенной в зигзаг или спираль проволоки. Материалом для электронагревателя обычно служит хромоникелевый сплав. Нагревательная спираль свободно укладывается в канавки керамического изолятора или в изолирующую массу (например, в окись магния).



Очень простым и широко распространенным электронагревательным прибором является электрокипятильник: изолированная нагревательная спираль у него расположена в коррозионно-стойкой металлической трубке. Чтобы можно было поместить нагревательную спираль необходимой длины, используют укладку петлями. Кипятильник опускается в сосуд с жидкостью, которая должна нагреваться. Выделение теплоты совершается внутри жидкости, и потерь теплоты почти нет. Электрокипятильник имеет поэтому очень высокий к. п. д., который при приближенных расчетах принимается за 100%.

В электрических кастрюлях, кофеварках и т. п. электронагреватель помещают или в дне сосуда или в стенках. Большинство кастрюль могут использоваться только наполненными жидкостью, так как в противном случае перегреваются. Некоторые современные конструкции самостоятельно отключают ток, размыкая электрическую цепь, если их включают по ошибке без жидкости.

Электрические кухонные плиты и плитки известны повсеместно. Они изготавливаются разнообразными по величине и устройству. С помощью переключателей можно устанавливать различные ступени нагрева, чтобы вести приготовление пищи наиболее экономно по расходу энергии. Многие электроплиты снабжены таймерами. С их помощью плита включается и выключается в заданное время или автоматически меняется режим нагрева. Для домохозяек, которые пользуются такими плитами, таймеры приносят большое облегчение.

У рассмотренных электронагревательных приборов теплота непосредственно передается нагреваемой среде. Постоянно исходящее от электронагревателя инфракрасное тепловое излучение играет здесь второстепенную роль. Теперь обратимся к приборам, в которых тепловое излучение является решающим фактором.

Уже в тостере кусочки хлеба не соприкасаются с электронагревателем (короткими стерженьками из материала высокого сопротивления). То же происходит и в жаровне с инфракрасным тепловым излучением: электронагреватель удален от жарящегося мяса.

Инфракрасное излучение используется также в электрических каминах. Они состоят из раскаляемых открыто

расположенных электронагревателей и пристроенного позади металлического рефлектора. Рефлектор направляет тепловое излучение в определенном направлении. Наиболее распространенным из таких электронагревательных приборов является комнатный электрокамин.

Все электрокамины имеют то общее, что они незначительно нагревают воздух в помещении. Теплота передается большей частью телам, на которые непосредственно падают инфракрасные лучи. Поэтому нагрев от каминов всегда "односторонен": нагреваются только тела, которые находятся в зоне облучения. Кроме того, степень нагрева быстро уменьшается с удалением от источника излучения.

Из-за большого расхода энергии электрокамины применяются только для кратковременного и дополнительного подогрева и ни в коем случае не могут заменить печи или водяное отопление. Важным преимуществом электрокаминов является то, что они дают теплоту сразу после включения, поэтому наиболее часто применяют сейчас инфракрасные излучатели в банях, ванных комнатах и т. п.

Если же требуется обогреть помещение, то следует прибегнуть к другим методам. Можно воспользоваться так называемым калорифером (обогревателем воздуха): вентилятор гонит поток воздуха между раскаленными электронагревателями. Воздух помещения нагревается и постоянно циркулирует. Температура в комнате повышается довольно быстро. Однако и этот метод пригоден только в особых случаях и только кратковременного использования.

В настоящее время регулярное электрическое отопление помещений считают возможным, если в основе его лежит "тепловой аккумулятор". Расход энергии в течение суток сильно колеблется (см. стр. 199). При этом ночью создается в общем "излишек" электроэнергии. Ее можно накапливать и сохранять для использования днем. Ночью ее поэтому превращают в тепловую энергию, которую используют затем днем.

Электрические аккумулирующие печи содержат массивный аккумулирующий теплоту блок из камня или гравия. В ночные часы с помощью электронагревателей температура этого блока доводится до нескольких сотен градусов. Утром

включается вентиляция. Комнатный воздух проходит через аккумулирующий блок и нагревается. В энергетическом отношении электрические аккумулирующие печи выгодны: днем они разгружают электрические сети, в ночное время реализуют избыток энергии. Выгодны они и владельцу печи, так как "ночной ток" отпускается по половинной цене.

Хорошим теплоаккумулятором является также вода. В тепловодяном аккумуляторе вода нагревается дешевым ночным током почти до кипения. Вода находится в хорошо изолированном сосуде и охлаждается очень медленно. Вследствие этого в дневные часы постоянно имеется горячая вода без дополнительных затрат электроэнергии. Аккумулирующие печи и тепловодяные аккумуляторы включаются и выключаются автоматически.

### **Электронагрев в промышленности**

На предприятиях и в мастерских нам встречается много электронагревательных приборов, обычно таких же, как и в быту, но несколько видоизмененных и, чаще, увеличенных размеров (см. например, рис. 10).

Заданная температура в химических ваннах или температура материалов поддерживаются с помощью электрообогрева.

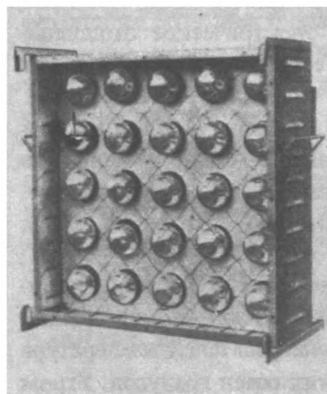


Рис. 10. Лучевой щит

Пресс-формы и пуансоны также подогреваются электронагревателями. Печи для закалки и отжига снабжены легко регулируемые электрическими нагревателями. На месте проволочных спиралей в качестве электронагревателей стоят чаще всего стержни из силита (соединение кремния с углеродом). Для высоких температур материалом для электронагревателей служат молибден и вольфрам.

Особое значение для промышленности приобрела за последние годы инфракрасная техника. Она может основательно изменить многочисленные емкие по времени и до сих пор несовершенные процессы сушки.

Если сушат инфракрасным облучателем, например, лакированные детали, то нагрев происходит в самом слое лака. Процесс сушки значительно ускоряется по сравнению с ранее принятым способом воздушного обогрева. При этом не возникает опасности, что поверхность лака быстро затвердеет и возникнут трещины. Кроме того, установка для сушки инфракрасным излучением легко регулируема и относительно проста в устройстве. Сушка происходит, когда деталь медленно перемещается в "сушильном туннеле", оборудованном инфракрасными облучателями. Можно сушить этим способом кузова автомобилей, все лакированные детали вагонов.

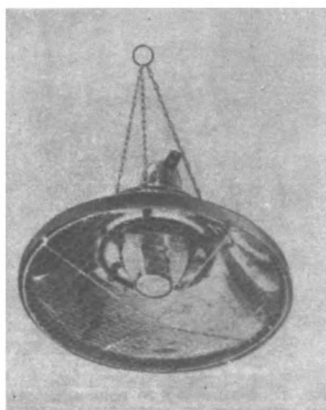


Рис. 11. Прибор для обогрева  
молодняка в животноводстве

Подобным простым способом можно сушить эмалированные и гальванизированные детали, литейные формы и стержни.

Бумажная масса и бумажное полотно сушатся сегодня также с помощью инфракрасных излучателей.

При производстве, например, печенья, в сельском хозяйстве (рис. 11) и во многих других сферах внедряют инфракрасную технику. Ее применение еще больше расширится в последующие годы.

Между двумя проводниками, которые сближены до касания, появляется контактное сопротивление. Если через цепь пропустить сильный электрический ток, то в месте касания проводников произойдет энергичное выделение теплоты.

Эта теплота используется в электрической контактной сварке (рис. 12). Обе соединяемые детали прижимают друг к другу.

Через оба электрода протекает сильный ток. В точке соприкосновения металл так сильно раскаляется, что плавится и сваривается.

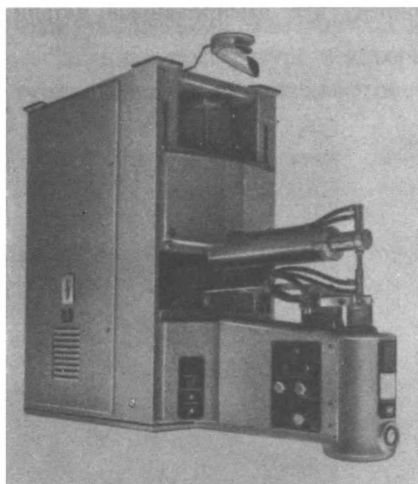


Рис. 12. Машина для точечной сварки

## Лампа накаливания

В память о первых послевоенных годах, когда не только электроэнергия, а и электролампы были драгоценностью, особый раздел в этой книге посвящается лампе накаливания, так как эту область электротехники — электротермию — в нашей жизни просто невозможно переоценить.

То, что электрический ток может нагреть проводник до каления, открыли еще в начале прошлого столетия. Однако было не просто сделать удобный и дешевый источник света из раскаленного проводника. Чтобы находящийся под напряжением проводник стал излучать яркий свет, его необходимо довести до белого каления. Но большинство проводящих материалов плавится уже при более низких температурах. Кроме того, их надо изолировать от кислорода воздуха, чтобы защитить от сгорания.

Поначалу считали наиболее подходящим материалом уголь: *Генрих Гобель* (1818 — 1893) натянул обугленные волокна бамбука внутри безвоздушного стеклянного сосуда; *Александр Николаевич Лодыгин* (1847 — 1923) вместо непрочных обугленных нитей использовал угольные палочки; *Томас Алва Эдисон* (1847 — 1931) усовершенствовал наконец лампу накаливания до такой степени, что она смогла совершить победное шествие по всему миру.

Свет "угольной лампы" был желтоватым, расход электроэнергии, отнесенный к светоотдаче, несуразно высок. Дальнейшее повышение температуры нити накаливания исключалось, так как уголь быстро "распылялся".

После длительных опытов удалось изготовить светящиеся нити из тугоплавких металлов — осмия (2500°C) и тантала (3000°C). Вольфрам (3370°C) долго не поддавался технологической обработке. Только в 1910 г. удалось изготовить лампу накаливания со светящейся нитью из вольфрама. С тех пор она главенствует. Однако приблизить температуру светящейся нити к точке плавления вольфрама так и не удалось. При относительно низкой температуре материал нити накаливания начинает распыляться, чему способствует наличие вакуума в баллоне лампы. Поэтому стали заполнять после откачки баллоны ламп химически неактивным азотом или инертным

газом. Благодаря этому распыление значительно уменьшается и нить накала быстро не сгорает. С другой стороны, опять заметно возросли потери теплоты, так как теплота наполнительного газа передается баллону. Но и здесь нашелся выход: нить накаливания сжимается до наименьшего возможного объема. Для этого нить свивают в спираль и полученную спираль еще раз свивают. Потери теплоты у лампы с такой дважды свитой спиралью относительно невелики. Температура нити накаливания приближается к  $3000^{\circ}\text{C}$ .

Несмотря на многочисленные усовершенствования, к. п. д. лампы накаливания остается очень низким по сравнению с другими многочисленными электрическими приборами. Более 95% подведенной электрической энергии преобразуется в теплоту, и только 5% — в свет. Поэтому ученые и техники уже десятилетия разрабатывают электрические источники света нового типа (см. стр. 135).

## ХИМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

### Диссоциация и электролиз

При прохождении тока через твердый проводник изменений в нем не наблюдается. Иначе обстоит дело с электропроводящей жидкостью. Рассмотрим пример.

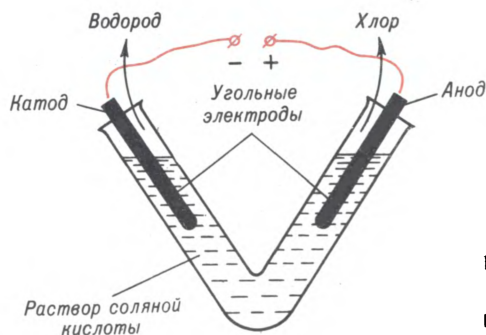


Рис. 13. Устройство для электрохимического разложения кислоты

На рис. 13 показана V-образная трубка, заполненная разбавленной соляной кислотой ( $\text{HCl}$ ), в которую погружены два угольных стержня в качестве *электродов*. Электроды присоединены к источнику постоянного тока. Как только включают ток, у электродов начинают выделяться пузырьки газа, а количество жидкости в трубке начинает постепенно уменьшаться. У отрицательного электрода (*катода*) выделяется газ, который легко определяется как водород. У положительного электрода (*анода*) выделяющийся газ резко пахнет и раздражает дыхательные пути; химическое исследование показывает, что здесь выделяется хлор. Соляная кислота под действием электрического тока разложилась на составные части — хлор и водород. Такое разложение с помощью электрического тока называют *электролизом*.

Электролитический процесс не ограничен разложением одной соляной кислоты. Все кислоты, щелочи, растворы и расплавы солей ведут себя подобным образом. Многие органические растворы, наоборот, не проводят электрический ток, т. е. электролитических явлений в них не происходит.

Поначалу предположили, что разложение проводящих жидкостей ("электролитов") вызвано тем, что молекулы жидкости "распадаются" под влиянием приложенного к электродам электрического напряжения. Это предположение, однако, противоречило наблюдению — электролитический процесс начинается при сколь угодно малом напряжении. Тогда предположили, что необходимо некоторое незначительное напряжение, при котором молекулы распадались бы на составные части.

Правильное объяснение этого явления дал шведский физик *Сванте Август Аррениус* (1859 — 1927). Многочисленные молекулы кислоты, щелочи, раствора или расплава соли распадаются на электрически положительно или отрицательно заряженные составные части, т. е. "диссоциируют". Под влиянием электрических сил они начинают перемещаться, за что и названы *ионами* — "странниками". Число положительных и отрицательных ионов в жидкости всегда одинаково. Поэтому жидкость электрически нейтральна.

Если погрузить в жидкость электроды, находящиеся под напряжением, то ионы с положительным зарядом, т. е.



с недостатком электронов, начнут двигаться к катоду, где пополняют свои недостающие электроны. Ионы с отрицательным зарядом движутся к аноду и там отдают свои излишние заряды.

Положительно заряженные ионы называют *катионами* (движутся к катоду): среди них водород и металлы. Отрицательно заряженные ионы называют *анионами*: к ним принадлежат "кислотные остатки", "группы ОН" щелочей.

Мы познакомились с новым типом электрической проводимости. В то время как в проводнике только электроны участвуют в электрической проводимости, в жидкости электропроводимость связана с переносом вещества. При этом не нарушается циркуляция электронов в цепи; у катода ионы пополняются электронами, в то же время ионы у анода отдают электроны.

Задолго до того как Аррениус создал свою теорию, велись исследования в поисках взаимосвязи между количеством выделенного вещества — в нашем примере, следовательно, хлора и водорода — и количеством электричества, затраченного на электролиз. Уже *Майкл Фарадей* (1791 — 1867) открыл фундаментальную зависимость:

*Количество выделенного при электролизе вещества пропорционально заряду (количеству электричества), перенесенному ионами.*

Это значит: количество выделенного вещества тем больше, чем больше будет ток, пропускаемый через электролит. Если увеличить силу тока, то за одно и то же время будет перенесен больший по значению заряд. При этом заряд, или количество перенесенного электричества, измеряют в ампер-секундах (А·с) или ампер-часах (А·ч). Если через сечение проводника за одну секунду протекает ток в один ампер, то это соответствует количеству электричества в одну ампер-секунду.

Из многочисленных опытов установлена следующая зависимость:

$$m = a I t. \quad (4)$$

Здесь  $I$  — сила тока;  $t$  — время;  $a$  — коэффициент пропорциональности, он соответствует отношению массы выделенного

вещества  $m$  к электрическому заряду, который прошел через электролит, является характеристикой данного материала и называется "электрохимическим эквивалентом" данного вещества. В зависимости от того, какие единицы подставить для времени и для массы, можно получить для  $a$ :  $\text{мг}/(\text{А} \cdot \text{с})$  или  $\text{г}/(\text{А} \cdot \text{ч})$ . Если, к примеру, для меди электрохимический эквивалент составляет  $0,3294 \text{ мг}/(\text{А} \cdot \text{с})$  или  $1,186 \text{ г}/(\text{А} \cdot \text{ч})$ , то это означает, что ток в  $1 \text{ А}$  в течение  $1 \text{ с}$  выделит  $0,3294 \text{ мг}$  меди, в то время как за  $1 \text{ ч}$  при силе тока в  $1 \text{ А}$  получают  $1,186 \text{ г}$ . Отдельные примеры электрохимических эквивалентов для основных веществ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Вещество	Значение $a$ , $\text{г}/(\text{А} \cdot \text{ч})$	Вещество	Значение $a$ , $\text{г}/(\text{А} \cdot \text{ч})$
Свинец	3,859	Серебро	4,025
Хром	0,323	Водород	0,0374
Медь	1,186	Кислород	0,2984
Никель	1,096	Хлор	1,3212
Цинк	1,219		

Если выразить электрохимический эквивалент для серебра в миллиграммах на ампер-секунду, то получим  $1,118 \text{ мг}/(\text{А} \cdot \text{с})$ . Это значение интересно, поскольку длительное время служило эталоном единицы силы тока.

Уже с первого взгляда из таблицы видно, что для выделения определенного количества вещества необходимы значительные количества электричества. И на самом деле электрохимические предприятия считаются самыми крупными потребителями электроэнергии.

**Пример.** Какое потребуется количество электричества, чтобы выделить  $1 \text{ кг}$  хлора, и сколько потребуется для этого киловатт-часов, если напряжение химического источника тока составляет  $4 \text{ В}$ ?

В соответствии с формулой (4)

$$It = \frac{m}{a} = \frac{1000}{1,3212} \frac{\text{г}}{\text{г}/(\text{А} \cdot \text{ч})} = 757 \text{ А} \cdot \text{ч}.$$

Работа, которую совершит ток,

$$W = UIt = 4 \cdot 757 = 3028 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3,028 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Рассмотрим другой пример. Сколько выделится меди за 24 ч из раствора медного купороса при токе в 12 А ?

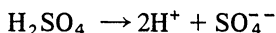
$$m = a It = 1,186 \cdot 12 \cdot 24 = 342 \text{ кг}.$$

Не всегда электролиз протекает так просто и наглядно, как это показано на примере разложения соляной кислоты. Часто происходят дальнейшие реакции, вторичные процессы. Но при этом всегда выполняются соотношения, установленные Фарадеем.

Известные электролитические явления сводятся к *разложению воды*. Если пропускают электрический ток через воду, к которой подмешано немного серной кислоты ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), то на катоде выделяется водород, а на аноде — кислород в отношении 2 : 1. Количество воды уменьшается, в то время как концентрация кислоты возрастает.

В действительности, однако, протекает более сложный процесс. Прежде чем его исследовать, необходимо ознакомиться с символами, которые приняты в электрохимии. Ион, который содержит избыточный электрон, обозначается сверху отрицательным штрихом, например  $\text{Cl}^-$ . Если ион имеет два избыточных электрона, то пишут два отрицательных штриха друг за другом. У положительного иона недостающие электроны обозначаются знаками плюс, поставленными сверху, например  $\text{H}^+$ . Сами электроны изображаются знаком минус в маленьком кружке  $\ominus$ .

Теперь вернемся к разложению воды. Молекулы серной кислоты диссоциируют по схеме:



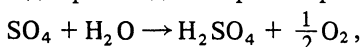
У катода ионы водорода восполняют электроны и соединяются в нейтральные молекулы водорода, которые улетучиваются, как газ:



У анода ионы  $\text{SO}_4^{--}$  отдают по два электрона и становятся электрически нейтральными:



Известно, что группа  $\text{SO}_4$  не может существовать самостоятельно. Она "разрывает" молекулу воды и захватывает водород. У анода происходит вторичная реакция:



где два атома кислорода образуют молекулу, которая сразу улетучивается.

Итак, установлено: на каждую молекулу серной кислоты, которая распадается, приходится новая молекула серной кислоты, причем дополнительно распадается молекула воды. Число молекул серной кислоты остается, следовательно, неизменным, в то время как число молекул воды постоянно уменьшается.

### Применение электролиза

Две области применения электрохимических явлений особенно важны для народного хозяйства: добыча важнейших исходных материалов для химической и металлургической индустрии с помощью электрического тока и электрохимическая очистка поверхности металлов.

Во многих отраслях промышленности необходима натриевая щелочь. Ее можно получать из поваренной соли. Если пропускать ток через раствор поваренной соли ( $\text{NaCl}$ ), то отрицательные ионы хлора перемещаются к аноду, отдают свой заряд и выделяются в виде газа. Это важнейший исходный продукт для химической промышленности. Положительные ионы натрия, наоборот, движутся к катоду. Там они восполняют электроны и нейтрализуют свой заряд. Так как натрий является химически очень активным элементом, то он тотчас соединяется с водой раствора поваренной соли. При этом возникает гидроокись натрия ( $\text{NaOH}$ ), водный раствор которой и является натриевой щелочью. Кроме того, у катода высвобождается водород. В промышленном производстве необходимо добиться того, чтобы хлор и щелочь оставались отделенными друг от друга, так как в противном случае может произойти нежелательная реакция, в ходе которой

образуется вновь хлорид натрия. Калийную щелочь получают электролизом хлорида калия (KCl).

Когда надо получить металл высокой чистоты, т.е. с низким содержанием примесей, часто тоже прибегают к электролизу. Высокая степень чистоты требуется от применяемой в электротехнике меди, так как при низкой степени чистоты сильно ухудшается ее проводимость. Поэтому изготавливаемая металлургией черновая медь, содержащая меди от 96 до 98%, не удовлетворяет требованиям электротехники и проходит дальнейшую электрохимическую обработку.

На рис. 14 показано, как располагаются друг против друга в растворе медного купороса тонкая пластина из чистой меди в качестве катода и блок черновой меди в качестве анода. К электродам подводится постоянное напряжение в несколько вольт.

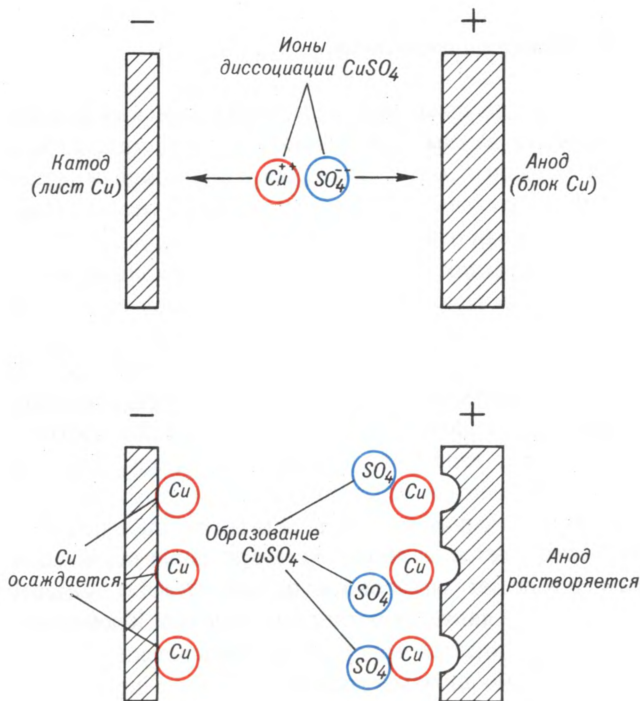


Рис. 14. Электролитическое получение чистой меди (схематично)

Положительные ионы меди перемещаются в растворе медного купороса к отрицательному электроду, где они нейтрализуются и оседают. Соответственно отрицательные ионы  $\text{SO}_4$  движутся группами к аноду. Там они образуют новые молекулы медного купороса, соединяясь с ионами меди из блока черновой меди. Этот процесс протекает непрерывно. При этом на катоде осаждается чистая медь, в то время как анод (блок черновой меди) постепенно растворяется. Примеси анода (блока черновой меди) в этом процессе не участвуют и выпадают на под как "анодный шлак" (рис. 15). Степень очистки таким образом полученной электролитической меди составляет 99,97%.

Важнейшим электрохимическим процессом в технике является также *электролиз расплава* алюминия (рис. 16).

Облицованная углем ванна наполняется смесью из глиноземных соединений алюминия и криолита. В смесь вводится угольный блок в качестве анода. Катодом служит угольная облицовка ванны. Постоянным током большой силы смесь прежде всего нагревают до расплавления. Криолит при этом в некоторой степени выполняет роль растворителя. В процессе электролиза он мало расходуется.

Положительные ионы алюминия в расплаве движутся к катоду, восполняют недостающие электроны и стекают вниз в виде металлического алюминия. Он остается в жидком состоянии. Время от времени его перемешивают на дне ванны. Поскольку глинозем является соединением алюминия с кислородом, то отрицательные ионы кислорода направляются к аноду. Там они соединяются с углеродом. Анод, следовательно, сгорает в ходе процесса и должен или постоянно опускаться в расплав или заменяться.

Потребление тока очень велико. Для получения 1 т алюминия требуется около 20 000 кВт·ч ( $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$ ). Большая потребность в алюминии для индустрии, транспорта и т. д., однако, оправдывает такие затраты энергии.

Подобным способом получают и другие легкие металлы, например магний и калий.

Медь выделяется из раствора медного купороса и в том случае, если в качестве катода используют какой-либо другой проводящий материал. Если, к примеру, в качестве катода



Рис. 15. Электролиз меди

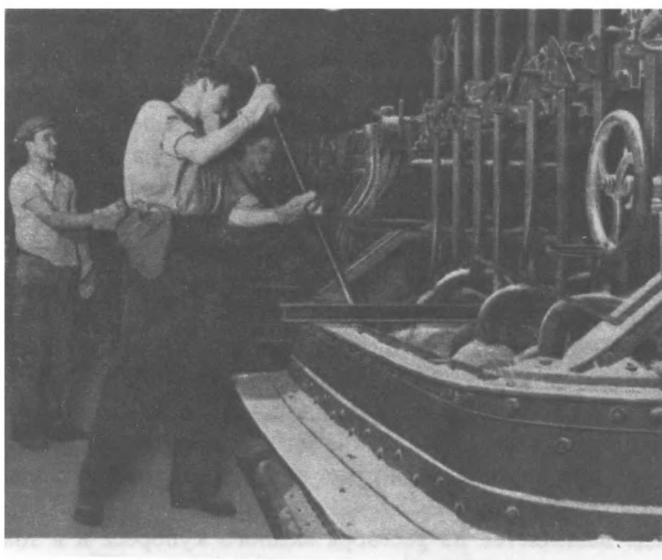


Рис. 16. Электролиз расплава алюминия

выбирают железные листы, то они покрываются слоем меди, толщина которого возрастает при увеличении силы тока и длительности процесса. Лист "омедняется".

Это еще одна большая область применения электрохимических явлений: поверхность металла или любые электрически проводящие плоскости можно покрывать другим металлом электрохимическим способом.

Железо и сталь относительно мало устойчивы против химического разъедания. Во всем мире год от года разрушаются от коррозии миллионы тонн железа и стали, да и каждый наблюдал, как быстро становится неприглядной металлическая поверхность только что наложенного сварочного шва.

Другие металлы, например цинк, никель или хром, а также серебро и золото, хотя химически и очень устойчивы, но не годятся по различным обстоятельствам для изготовления деталей. Электрохимия позволяет использовать преимущества этих металлов для защиты других металлов, которые химически легко разъедаются.

Если поместить изделие из стали в раствор никелевой соли, подключить изделие к цепи в качестве катода, а пластину из никеля — в качестве анода, то сталь покроется слоем никеля. Если работают с анодом из хрома и раствором солей хрома, то служащие катодом изделия хромируются. При использовании анода из серебра в растворе соли серебра изделия серебрятся. В технике широко пользуются *гальванизацией* для защиты поверхности металла или в эстетических целях.

Алюминий постоянно покрывается слоем тонкого налета из окиси. Этот слой весьма полезен, так как выполняет роль защитного покрытия. При так называемом "анодировании" (электрическое окисление) слой окисла создают и закрепляют искусственно. Анодируемое изделие является анодом в специальной химической ванне. Соответствующим выбором жидкости для ванны добиваются, чтобы алюминиевый анод не растворялся, а его поверхность покрывалась окисью алюминия. Этот защитный слой в известной мере "растет" в металл и не дает растворяться подкладке. Он химически и механически очень устойчив и, кроме того, может легко окрашиваться.



Если подвесить в электрохимической ванне в качестве катода рельефную проводящую деталь и оставить под током достаточно долго, то образуется толстый слой металлического покрытия. Если этот слой осторожно отделить, то его обратная сторона, как "негатив", покажет все возвышения и углубления катода. Далее можно отлить отпечаток, например, из воска и так получить копию первоначально помещенной в ванну детали.

Такое использование электрохимических явлений называют *гальванопластикой*. Она давно применяется для получения копий небольших предметов искусства или старины, монет и т. д. Можно получать даже копии непроводящих деталей, если предварительно покрыть их тонким проводящим поверхностным слоем, например слоем графита.

Индустрия грампластинок появилась тоже не без гальванопластики. При записи на восковой пластине вырезаются штихелем соответствующие звуковым колебаниям боковые или глубинные бороздки. Они, естественно, очень непрочны. Поэтому их покрывают микроскопически тонким слоем графита и помещают в электрохимическую ванну, в которой они металлизуются. Слой металла представляет собой негатив восковой пластинки вместе с бороздками. Этот слой снимается и обрабатывается так, чтобы он мог служить пуансоном при штамповке пластинок.

Подобным образом происходит изготовление "гальваноформ" в полиграфической промышленности. При высоких требованиях к печатной продукции почти невозможно печатать непосредственно с набора, так как он быстро изнашивается. Поэтому сначала делают оттиск с металлического набора — "матрицу" — из мягкого материала, например из воска или пластмассовой пленки. На матрице все выступы набора воспроизведены как впадины.

Матрица покрывается проводящим слоем графита и помещается в качестве катода в электрохимическую ванну с медным анодом. Матрица покрывается слоем меди, выступы медного покрытия соответствуют впадинам матрицы. Следовательно, слой меди является копией первоначального набора. Слой аккуратно снимается, облуживается и покрывается свинцом.

## Химические источники тока

Если погрузить два различных металла или металл и уголь в электрически проводящую жидкость, то между металлами или металлом и углем возникает измеримое электрическое напряжение. Если соединить электроды с потребителем тока, то по цепи потечет электрический ток. Перед нами химический источник напряжения — ”гальванический элемент”.

Гальванические элементы известны с начала XIX в. Они тогда были единственными источниками тока, которые могли давать по тем временам значительную мощность; названы так в память об итальянском враче и естествоиспытателе *Луиджи Гальвани* (1737 — 1798). Во время своих знаменитых опытов с препарированными лапками лягушки он открыл этот вид электричества. Конечно, он не мог еще правильно объяснить наблюдаемые явления, но догадывался об особом виде ”животного электричества”.

Если опустить металл в электролит, то проявляются два эффекта, действующих друг против друга.

Металл подвергается давлению раствора. Он стремится оторвать ионы металла и перевести их в жидкость. Наоборот, жидкость на основе ”осмотического давления” стремится вытолкнуть ионы металла. При этом постоянно устанавливается равновесное состояние.

Если, например, погрузить цинковую пластину в разбавленную серную кислоту, то преобладающим будет давление раствора цинка. Положительные ионы цинка перейдут в раствор. Вследствие этого цинковая пластина (не так, как при электролизе) становится электрически отрицательно заряженной. Процесс разделения зарядов не развивается бесконечно. Чем больше ионов переходит в жидкость, тем сильнее отталкиваются последующие заряды от имеющихся уже в жидкости и одновременно тем труднее удерживается увеличивающийся отрицательный заряд цинковой пластины. Кроме того, с ростом числа ионов возрастает осмотическое давление жидкости, которое направлено против давления раствора.

Если осмотическое давление больше давления раствора, то ионы металла выталкиваются из жидкости и металл

осаждается. Вследствие этого металл становится электрически положительно заряженным в противоположность жидкости. Но скоро вновь устанавливается равновесие, так как осмотическое давление уменьшается из-за осаждения ионов.

Между металлом и жидкостью электролита в обоих случаях возникает электрическое напряжение. Однако оно непосредственному измерению недоступно. Если все же хотят измерить напряжение, возникающее между металлом и электролитом, необходимо (как в вышеупомянутом опыте) погрузить в жидкость два металла. Появляющееся между этими электродами напряжение является разностью или суммой отдельных напряжений между каждым электродом и электролитом. Если выбрать одинаковый металл для обоих электродов, то напряжения взаимно уничтожатся. Значение напряжения зависит от материала электродов и электролитической жидкости и не зависит от размеров, расстояния и формы электродов.

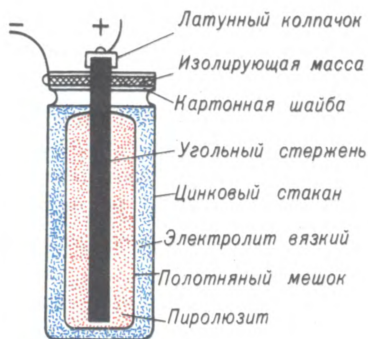
Если использовать одинаковый электролит, то различные материалы, используемые в качестве электродов, можно расположить в зависимости от значения междуэлектродного напряжения в "электрохимический ряд":

"+ " Уголь, платина, золото, серебро, медь, олово,  
свинец, цинк, алюминий, магний "—"

Если конструируют гальванический элемент из двух любых веществ, которые приведены в этом ряду, то вещество, стоящее левее в ряду, становится положительным полюсом. Например, при комбинации "уголь — медь" у угля образуется положительный полюс, у меди — отрицательный; при комбинации "магний — серебро" у магния образуется отрицательный полюс, у серебра — положительный. Чем дальше друг от друга расположены два вещества в электрохимическом ряду, тем больше исходное напряжение изготовленного из них гальванического элемента.

Электрохимический ряд напряжений открыл большие возможности для создания гальванических элементов. Многие из них создавались в прошлом столетии. Однако значительных успехов достигнуто не было. Наибольшее значение сегодня имеет угольно-цинковый элемент (рис.17), в особенности

Рис. 17. Устройство сухого элемента



как "сухой элемент", известный нам по батареям карманных фонарей, батареям для портативных радиоприемников, слуховых аппаратов и т. д.

Угольно-цинковый элемент состоит из угольного стержня в качестве положительного электрода и цинкового цилиндра — в качестве отрицательного. Электролитом служит раствор нашатыря. Начальное напряжение такого элемента составляет примерно 1,5 В.

Напряжение элемента, однако, быстро падает, если угольный стержень не окружен пиролюзитом ( $MnO_2$ ), помещаемым в маленький мешочек. Происходит это так. Если элемент дает ток, то угольный стержень быстро покрывается слоем пузырьков водорода. Из-за этого уменьшается поверхность соприкосновения между углем и электролитом, возрастает внутреннее сопротивление элемента. Кроме того, возникает противо-э. д. с. элемента. Это явление наблюдается у всех гальванических элементов и называется "поляризацией". В угольно-цинковом элементе роль "деполяризатора" принимает на себя богатое кислородом соединение пиролюзита. Возникает химическая реакция, в ходе которой водород соединяется с частью содержащегося в пиролюзите кислорода, образуя воду. Так устраняется поляризация. Только при большой нагрузке элемента, т. е. при отборе сильных токов, водород образуется так быстро, что поляризация не может компенсироваться тотчас. В этом случае падает э. д. с. элемента. Если элемент оставляют долгое время без нагрузки, то водород "связывается" и элемент опять "восстанавливается"

В "сухих" элементах в качестве электролита применяется вязкая паста. Имеются также угольно-цинковые элементы, которые используют для деполяризации кислород воздуха.

Вследствие развивающейся миниатюризации электрических, электронных и радиотехнических устройств, а также вследствие снижения электропотребления приборами, которые основаны на полупроводниковых элементах, значение гальванических элементов в последние годы опять возросло.

Удалось создать удивительно маленькие, легкие и притом работоспособные элементы, которые могут питать током год и более электрические наручные часы. Для таких элементов требуются специальные электродные материалы и электролиты (например, окись ртути, амальгама цинка и раствор едкого кали).

### **Аккумуляторы**

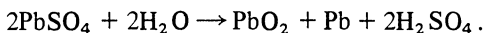
Химические процессы, которые протекают в гальванических элементах, в обычных условиях не могут идти в обратном направлении. Поэтому гальванический элемент утрачивает ценность, когда израсходуется. По этой причине гальванические элементы не применяются, когда заранее требуется большое количество электроэнергии, — слишком велик был бы расход материалов.

Широко распространенными химическими источниками тока являются аккумуляторы. Они могут при получении тока извне претерпевать химическое превращение в обратном направлении, т. е. восстанавливать свою емкость. Эти процессы, называемые "разрядом" и "зарядом" аккумулятора, могут повторяться сотни раз.

Особенно распространенным является свинцовый (кислотный) аккумулятор. Он состоит из групп "положительных" ( $\text{PbO}_2$ ) и "отрицательных" ( $\text{Pb}$ ) пластин, которые размещены в сосуде. Электролитом служит разбавленная серная кислота ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ). Пластины каждой группы соединяются друг с другом. Обе группы пластин располагаются так, чтобы они входили друг в друга наподобие гребенок.

Чтобы действующая поверхность была наибольшей, пластины делают ребристыми или придают им форму решетки. Зазоры между ребрами или решетками заполняются массой из соединений свинца. Если пластины погрузить в раствор серной кислоты, то на их поверхности образуется вещество, называемое сульфатом свинца.

Если отрицательные пластины соединить с "–", а положительные — с "+" источника тока, то начинается химическая реакция. Сульфат свинца отрицательных пластин превращается в свинец, а из сульфата свинца положительных пластин образуется окись свинца. Кроме того, за счет разложения воды происходит образование "новой" серной кислоты. Плотность кислоты возрастает. Этот процесс схематически можно изобразить так:



Какое количество электричества могут отдать или потребить аккумуляторы при их заряде или разряде, зависит от их размеров и конструкции. Эту способность к накоплению характеризуют как "емкость" аккумулятора и измеряют в кулонах или ампер-часах. Если емкость аккумулятора составляет 50 А·ч ( $50 \cdot 3600$  Кл), то это означает, что он может давать ток силой в 5 А в течение 10 ч или в течение 20 ч ток силой 2,5 А. Конечно, можно не делить произвольно характеристику на разрядный ток и время разряда. Тогда устанавливают номинальный режим разряда, при котором источник тока отдает практически наибольшую емкость. Если это значение будет превышено, то аккумулятор подвергнется опасности выхода из строя. Также емкость аккумулятора снижается в тем большей степени, чем больше ток разряда. Из этих соображений устанавливают "нормальную" емкость на уровне трехчасового разряда.

Для накопления больших количеств энергии аккумулятор непригоден. Масса аккумуляторной батареи, которая может запасти 1 кВт·ч, составляет примерно 50 кг. К недостаткам свинцового аккумулятора следует отнести и то, что он чувствителен к электрической перегрузке и механическим напряжениям.

”Аккумулятор Эдисона” (”стальной” аккумулятор) использует в качестве электролитической жидкости едкое кали (КОН), в качестве электродных материалов — соединения железа и никеля. Разрядное напряжение стального аккумулятора составляет только 1,2 В. Однако механически он очень устойчив; также ему мало опасны перегрузки при разряде. При разряде и заряде выделяется немного газа.

Дальнейшее усовершенствование щелочных аккумуляторов (например, кадмиево-никелевых) весьма сложно. Их необходимо герметизировать. Это особенно важно для источников питания переносных аппаратов (электронная фото вспышка, электробритва, портативный радиоприемник).

Стремление к миниатюризации электрических и электронных приборов ведет к появлению новых типов аккумуляторов, которые предназначаются уже для специальных целей. Так, применяется серебряно-цинковый аккумулятор, масса которого при равной мощности составляет около  $1/3$  массы свинцового аккумулятора.

## СТАТИЧЕСКОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

### Взаимодействие зарядов

Электротехника рассматривает прежде всего движение и взаимодействие электрических зарядов, т.е. электрический ток.

Однако значительно раньше, примерно за тысячелетие, были известны только те электрические явления, при которых электрические заряды находились в покое и оставались на одном месте. Об этом покоящемся, ”статическом” электричестве и будет рассказано ниже.

Было обнаружено, что некоторые материалы (например, янтарь, сера, стекло) странно ведут себя, если их потереть о шерсть: они притягивают легкие предметы (пушинки, шерстяные волокна, обрезки бумаги), которые по прошествии некоторого времени опять освобождаются. Позднее

наблюдалось, что от такого натертого тела проскакивала искра к другому телу, если они сближались.

Эти материалы, следовательно, становились от трения "электрическими", причем название это произошло от греческого слова "электрон", обозначающего янтарь. Вскоре было установлено существенное различие между такими материалами: при электризации трением два стеклянных стержня отталкиваются друг от друга, а стержень из смолы, наоборот, притягивает стеклянные стержни; два куса смолы отталкиваются друг от друга, но притягивают заряженный стеклянный стержень; сера, наоборот, отталкивает их.

Эти наблюдения привели к выводу: существует "*стеклянное электричество*" и "*электричество смолы*". Позднее стали называть заряженное вещество, которое вело себя как стекло, электрически положительным, а вещество, которое проявляло себя подобно смоле, электрически отрицательным. При этом было ошибочно предположено, что положительное электричество одинаково подвижно и переносимо, как и отрицательное. Это заблуждение сначала, однако, не мешало действовать. Так, и сегодня справедливо установленное в те времена положение:

*Заряды одинаковых знаков отталкиваются,  
заряды противоположных знаков притягиваются.*

Как понимается теперь "электризация трением"? Чтобы тело оказалось электрически заряженным, оно должно обладать избытком или недостатком электронов. Следовательно, можно предположить, что при трении происходит "разделение зарядов", вследствие чего одно из тел лишается электронов, в то время как на другом теле они накапливаются. Действительно, при всех опытах установлено, что электрически заряжается не только натираемое тело, а и другое, "дающее" электрический заряд и противостоящее натираемому телу.

Для объяснения перехода электронов полагают, что различные вещества обладают также различной способностью к отдаче и приобретению электронов. Если тесно соприкасаются два различных вещества, то электроны переходят к материалу, обладающему большей способностью к накоплению



электронов. Если теперь отдалить тела друг от друга, то различие в заряде сохраняется: одно тело электрически заряжается положительно, другое — отрицательно.

Теперь речь пойдет не о "трении", а только о соприкосновении. Действительно, это явление зависит только от возможно более тесного соприкосновения обоих тел.

Что, действительно, дело в соприкосновении, а не в трении, можно доказать простым опытом. Еще Вольта демонстрировал, что две идеально гладкие пластины из разных металлов приобретают электрический заряд, если их сначала наложить друг на друга, а затем внезапно разъединить. Если погрузить в воду закрепленный на изоляторе парафиновый шар, а затем быстро его вытащить, то вода зарядится электрически положительно, а парафиновый шар — отрицательно.

Закон об отталкивании друг от друга одноименных зарядов справедлив не только для различных тел. Одноименные заряды *одного* тела внутри него постоянно стремятся по возможности отдалиться друг от друга. Правда, удастся им это только в проводнике, в котором электрические заряды достаточно подвижны. Отсюда следует важное правило:

*В заряженном проводнике заряды постоянно расположены на поверхности проводника.*

Если внести заряд в середину проводника, например внутрь пустотелого металлического шара, то он немедленно перейдет наружу, на внешнюю поверхность шара. Внутренняя поверхность шара окажется свободной от заряда.

Заряды, которые находятся снаружи на шаре или на другом пустотелом предмете, не могут перейти внутрь. В этом состоит принцип "клетки Фарадея". Если необходимо защитить от внешнего электрического воздействия чувствительный измерительный прибор или другой аппарат, его помещают в "клетку" из жести или из мелкой проволоочной сетки (экранируют). Если наружная поверхность этой "клетки" назлектризована, то, как доказано, на внутренних стенках электрического заряда нет. Благодаря защитному действию экрана пассажиры железнодорожного поезда, закрытого автомобиля

или кабины самолета находятся в относительной безопасности от ударов молнии.

### Применение электростатических явлений

Уже *Отто Герике* (1602–1686) построил простую ”электризирующую машину”. Так назывался аппарат, с помощью которого можно было посредством трения непрерывно получать электрические заряды. Его машина представляла собой, по существу, большой шар из серы, который мог свободно вращаться. Если вращали шар и одновременно касались его рукой для ”производства трения”, то сера заряжалась. Герике мог получать от заряженного шара длинные искры и проводить многочисленные эффектные опыты. Его электризирующая машина вскоре была существенно усовершенствована. В результате стало возможным получать очень высокие напряжения — до сотен тысяч вольт, но количество зарядов оставалось намного меньшим, чем необходимо для возникновения технически применяемого тока на достаточно длительное время.

Заряд от трения возникает очень часто. Общеизвестно, что наши волосы и расческа становятся ”электрическими”, когда расчесываем сухие волосы. Вызывает неудобство тот факт, что и другие предметы склонны заряжаться: на грампластинки, например, упорно оседает пыль и попытки ее стирать только ухудшают дело; пластинки от этого заряжаются еще сильнее и удерживают пыль еще крепче. Помощь в данном случае может оказать так называемый ”платок-антистатик”, при вытирании которым пластинки заряд сразу снимается. При известных обстоятельствах приводной ремень заряжается до такого высокого напряжения, что между ремнем и заземленными металлическими частями проскакивают длинные искры. Подобные явления могут наблюдаться на предприятиях текстильной и бумажной промышленности. Здесь эти явления очень мешают, так как бумажные листы слипаются друг с другом, а нити притягиваются или смещаются и т.п. Заряд снимают искусственным повышением влажности воздуха или тем, что у опасных мест помещают радиоактивные

препараты, которые делают воздух частично электрически проводимым, так что заряд сразу отводится.

Также при течении непроводящей жидкости через трубы или сопла из изолируемых материалов может возникать сильная электризация. Это опасно, так как многие непроводящие жидкости, например бензин, горючи. Из-за электростатических зарядов уже многократно происходили взрывы горючего.

Силы притяжения или отталкивания между двумя заряженными телами очень скоро стали использовать для создания приборов, обнаруживающих электрические заряды. В "электроскопе с золотыми листиками" к металлическому стержню, который введен внутрь прозрачного сосуда, прикреплены две узкие золотые полоски. Если коснуться шарика или пластинки на конце стержня электрически заряженным предметом, то заряд сообщится металлической штанге и золотым полоскам. Вследствие одноименности заряда листики разойдутся далеко друг от друга.

В "электростатическом измерителе напряжений" (рис. 18) на незначительном расстоянии друг от друга помещены три металлические пластины. Средняя пластина может отклоняться в сторону и перемещать стрелку с помощью наилегчайшей системы рычагов. Стрелка расположена перед шкалой. Средняя пластина соединена с одной из внешних пластин. Если к внешней пластине приложить напряжение, то средняя пластина

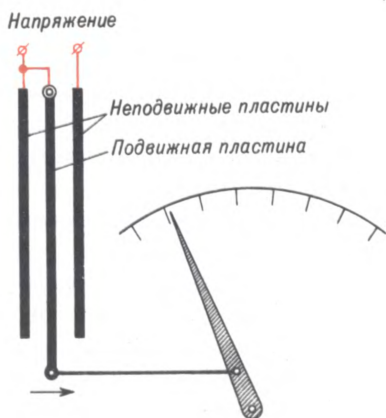


Рис. 18. Электростатический измеритель напряжения

притягивается к одной внешней пластине и отталкивается от другой. Она отклоняется в сторону и двигает стрелку по шкале.

Преимущество электростатического измерителя напряжения по сравнению с большинством других измерительных приборов состоит в том, что через него практически не протекает ток. Он может, кроме того, найти применение при измерении как постоянного, так и переменного напряжения низкой частоты. "Чувствительность" электростатического измерителя напряжения, однако, относительно мала, так как только при напряжении около 100 В возникает достаточно значительная сила притяжения, которая может регистрироваться прибором.

### Электрическое поле

Заряженные тела или притягиваются или отталкиваются. Действующие силы, однако, не остаются ограниченными только самими телами; они проявляются также в объеме между ними и в их окружении.

Это можно легко доказать на многих примерах. Например, если поместить шерстяные нити между двумя электрически заряженными пластинами (рис. 19), то нити расположатся так, что окажутся вытянутыми от пластины к пластине. Точно так же ведут себя кусочки соломы или узкие кусочки

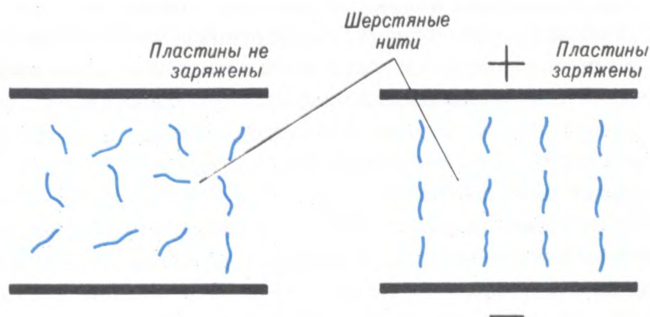


Рис. 19. Силы в электрическом поле

бумаги. Если подвесить электрически заряженный металлический шарик в пространстве между пластинами, то он отклонится в ту сторону, где находится пластина с зарядом, противоположным заряду шарика. Если поместить в пространстве между пластинами маленький столик из изоляционного материала, поверхность которого посыпать пробковой мукой или нанести на поверхность пульверизатором кристаллы гипса, то возникнут характеристические линии, которые в пространстве между пластинами расположатся параллельно, а за краем пластины изогнутся наружу.

Описанные и многие другие опыты показывают, что имеется непрерывная область пространства, в которой действуют силы, вызванные зарядами. Эту область называют *электрическим полем*.

Чтобы лучше описать электрическое поле и его формы, ввели чрезвычайно плодотворное понятие "линии электрического поля", или "силовые линии". Это воображаемые линии, которые проходят от одного как подвижного, так и неподвижного заряда к другому и в каждой точке электрического поля указывают направление действующей силы.

Опыт с кристаллами гипса или с крошками пробки уже дает наглядную, хотя и плоскостную картину электрического поля между двумя заряженными пластинами. Электрическое поле других заряженных тел можно изобразить подобным же образом (рис. 20 и 21). Бумажные флажки, если расположить их у силовой линии, установятся тангенциально к ней, если будут иметь возможность достаточно легко поворачиваться.

Воображаемый положительный, бесконечно малый и легко подвижный заряд, будучи "помещенным" на силовую линию, стал бы передвигаться вдоль нее к отрицательно заряженному телу. Это представление происходит от стремления присвоить силовой линии определенное направление, а именно: от положительного к отрицательному заряду. Это положение произвольно, но исторически обусловлено. Наши сегодняшние познания намного точнее: на силовой линии находится электрон (отрицательный заряд) и движется он по силовой линии к положительному заряду.

При исследовании электрических полей установлено, что силовые линии заканчиваются всегда перпендикулярно

Рис. 20. Электрическое поле между двумя пластинами

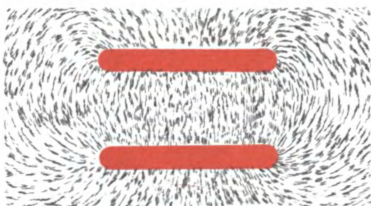
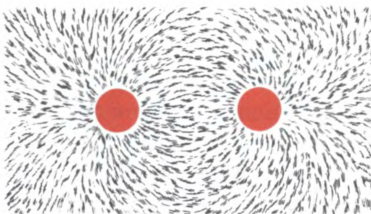


Рис. 21. Электрическое поле между двумя шарами



заряженным телам и нигде не пересекаются. Силовые линии, кроме того, стремятся сократиться, но не сливаются друг с другом. Они находятся как бы в состоянии "растяжения" в направлении силовой линии и "сжатия" — поперек нее.

Поля, силовые линии которых расположены параллельно и равномерно плотно, называют "гомогенными" (однородными). Однородным можно считать поле между параллельными заряженными пластинами, поэтому пока и ограничимся рассмотрением объема только между пластинами.

Исследуя поведение маленького заряженного металлического шарика, убеждаемся в том, что во всех точках однородного электрического поля этот шарик отклоняется одинаково. Это означает, что отклоняющая сила во всех точках одинакова.

Чтобы установить, от каких факторов зависит эта сила, повышаем напряжение одинаково на обеих пластинах, не меняя расстояния между ними. Тотчас увеличивается отклонение шарика. Точными измерениями устанавливается, что увеличение напряжения вдвое вызывает возрастание вдвое и действующей силы, увеличение напряжения втрое вызывает трехкратную силу. Напряжение на пластинах и отклоняющая сила прямо пропорциональны друг другу.

Теперь раздвинем пластины, не меняя напряжения. В этом случае действующая на шарик сила уменьшится обратно пропорционально расстоянию. Если увеличить расстояние между пластинами вдвое, то сила уменьшится наполовину и т.д.

Если изменить одновременно напряжение и расстояние, то отклоняющая сила окажется пропорциональной отношению напряжения на пластинах к расстоянию между пластинами:

$$F \sim \frac{U}{d}.$$

Это отношение выражает не что иное, как "падение напряжения" вдоль силовой линии поля, т.е. значение напряжения, которое приходится на сантиметр длины силовой линии. Оно получило название "напряженность (сила) электрического поля"  $E$ . Для однородного электрического поля, следовательно,

$$E = \frac{U}{d}.$$

Единицей напряженности электрического поля  $E$  в системе СИ является вольт на метр (а также кратные и дольные единицы).

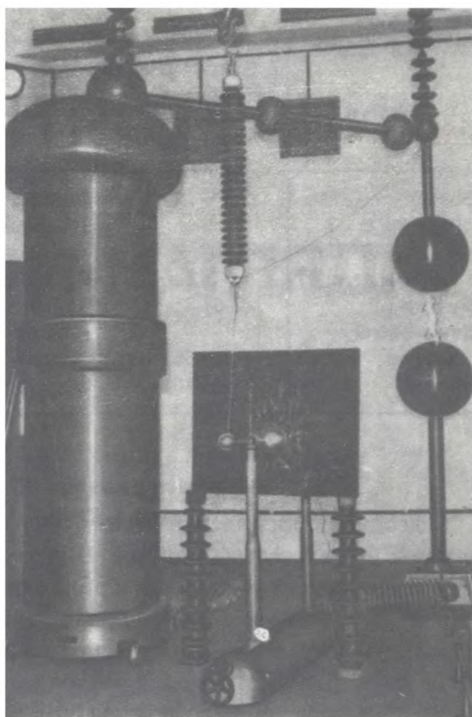
Обозначенная нами величина  $E$  справедлива только для особого случая однородного поля. В общем случае напряженность электрического поля обозначают  $E$ , чтобы подчеркнуть, что имеют дело с вектором, т.е. с величиной, которая характеризуется не только численным значением, но и направлением.

**Пример.** Если к двум параллельным пластинам, отстоящим друг от друга на 5 см, приложено напряжение в 50 В, то напряженность электрического поля

$$E = \frac{U}{d} = \frac{50}{5} = 10 \frac{\text{В}}{\text{см}}.$$

Если повышают напряжение или уменьшают расстояние между пластинами, то напряженность поля возрастает. Она имеет одинаковое значение и направление во всех точках однородного поля.

Рис. 22. Испытания нового изоляционного материала в лаборатории высоких напряжений



Однако безграничное повышение напряженности поля невозможно. Если она превысит определенное значение, зависящее от материала между пластинами, то произойдет непроизвольное выравнивание заряда в форме электрического разряда, электрических искр.

Значение напряженности поля, при котором происходит "пробой", имеет большое значение для электротехники; оно указывает, какое наивысшее напряжение может выдержать данный изолирующий материал при определенной толщине (рис. 22). Некоторые данные об электрической (пробивной) прочности приведены в табл. 3.

Данные таблицы указывают, что, например, необходимо напряжение в 3200 В для пробоя слоя воздуха в 1 мм, напряжение от 6000 до 8000 В для того, чтобы пробить слой плотной бумаги в 1 мм и т.д.



Таблица 3

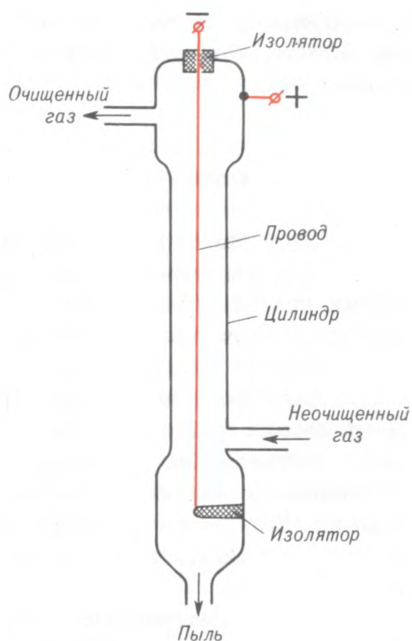
Материал	Электрическая (пробивная) прочность, кВ/мм	Материал	Электрическая (пробивная) прочность, кВ/мм
Воздух [при 20°C и $1,013 \cdot 10^5$ Па (760 мм рт. ст.)]	3,2	Парафин	40
Бумага	6—8	Закаленное стекло	20—50
Закаленный фарфор	30—55	Полистирол	50—55
Эбонит	15—40	Поливинил- хлорид (ПВХ)	20—60
		Слюда	60
		Стирофлекс	100

В неоднородных электрических полях соотношения неодинаковы и значительно сложнее. В них уже нет соответствия между длиной силовых линий и расстоянием между зарядами, кроме того, силовые линии проходят не параллельно и не одинаково плотно. Поэтому напряженность электрического поля имеет разное значение и разное направление при переходе от одной точки пространства к другой в неоднородном поле.

Можно доказать, что напряженность (сила) поля больше там, где наиболее уплотнены силовые линии. Как показывает картина силовых линий, это имеет место на остриях, ребрах или на закруглениях с малыми радиусами кривизны. В этих местах появляется особенно высокая напряженность поля. Может возникать так называемое "явление острия": в непосредственной близости от ребра или острия воздух становится частично электрически проводящим, и в этом месте электрический заряд начинает стекать с тела в пространство.

Обычно это явление в технике нежелательно. Так, на дальних линиях высокого напряжения всегда известная доля энергии рассеивается в пространство из-за "эффекта короны" (это не что иное, как возникающий у проводов "эффект острия") и таким образом теряется для потребителя. Острия и ребра приборов, которые находятся под высоким

Рис. 23. Электростатическая очистка газов от пыли



напряжением, являются при равных условиях наиболее вероятными местами для искрового разряда или пробоя. Когда в атмосфере скапливаются большие заряды электричества, "эффект острия" наблюдают иногда у металлических шпилей, на ветвях или мачтах в виде разветвленных "огней святого Эльма".

С другой стороны, "эффект острия" успешно применяют, когда хотят очистить дымовые газы от пыли (рис. 23). Дымовые газы проходят через вертикальный заземленный металлический цилиндр. По продольной оси цилиндра натянута проволока, тщательно изолированная от стенок цилиндра. Цилиндр и провод включаются в цепь источника высокого напряжения. В непосредственной близости от проволоки силовые линии электрического поля располагаются более плотно. Возникает очень сильное поле. Вследствие этого электроны из проволоки "вырываются". Они устремляются в радиальном направлении и при этом отрицательно заряжают пролетающие мимо соринки. Стенки цилиндра, соединенные

с положительным полюсом источника тока, притягивают эти частицы. Они ударяются о стенку, отдают свой заряд и падают вниз.

## Конденсатор

Этот раздел начнем с того, что введем новое название для расположенных друг против друга изолированных пластин. Назовем их *конденсатор*. Его важнейшее свойство заключается в том, что он может накапливать известное количество электричества. Если присоединить пластины к источнику тока, то в течение короткого времени в конденсатор потечет "зарядный ток". Если отключить источник, заряд останется на конденсаторе. Разноименные заряды удерживаются на обеих пластинах до известной степени взаимно. Если затем соединить пластины проводником, то конденсатор зарядится, а заряд выравняется через "разрядный ток".

Количество электричества, которое может накопить конденсатор, конечно, очень мало по сравнению с протекающим через электрический прибор. Конденсатор поэтому ни в коем случае не может выступать заменителем аккумулятора, но зато он пригоден для "ударного" разряда, т.е. там, где на очень короткое время необходимо располагать относительно большой электрической *мощностью*. Это, например, необходимо для зажигания электронной фотовспышки.

От каких величин зависит заряд конденсатора?

Если повысить напряжение, то в конденсаторе появится дополнительный заряд; если понизить напряжение, то заряд стечет с конденсатора. Следовательно, существует прямая связь между зарядом конденсатора и приложенным к нему напряжением.

Электрические заряды, находящиеся на пластине конденсатора, отталкиваются друг от друга в силу одноименности. Этому отталкиванию противостоит "давление" электрического напряжения. В заряженном конденсаторе, таким образом, "царит равновесие". Если напряжение возрастает, то заряды "уплотняются"; вследствие этого находится место

на конденсаторной пластине для новых зарядов. И, наоборот, если напряжение падает, то преобладающими становятся силы отталкивания; заряды "вытесняются" с конденсаторной пластины.

Значения заряда  $Q$ , который приобрел конденсатор, и напряжения  $U$  пропорциональны друг другу. Коэффициент пропорциональности  $C$ , который связывает обе величины, постоянен для каждого конденсатора и зависит только от его конструкции. Следовательно, можно записать:

$$Q = CU \quad \text{или} \quad C = \frac{Q}{U}.$$

Так как коэффициент пропорциональности дает сведения о том, больший или меньший заряд может воспринять конденсатор, то его называют "емкостью" конденсатора.

Единицей электрической емкости является *фарад* (Ф), названный так в честь английского физика *Майкла Фарадея* (1791–1867). Конденсатор имеет емкость 1 Ф, если количество электричества в 1 Кл заряжает его до напряжения 1 В. Следовательно, справедливо соотношение:

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

Для практических целей, однако, эта единица слишком велика. Поэтому вводят дольные единицы:

$$1 \text{ микрофарад (мкФ)} = 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$1 \text{ нанофарад (нФ)} = 10^{-9} \text{ Ф};$$

$$1 \text{ пикофарад (пФ)} = 10^{-12} \text{ Ф}.$$

Если увеличить размеры пластин, то можно, естественно, "уместить" на них большее количество электричества. Емкость возрастает, следовательно, с увеличением размеров пластин. Если уменьшить расстояние между пластинами, то емкость возрастет, и, наоборот, при увеличении расстояния между пластинами емкость снизится. Существенную роль, кроме того, играет находящийся между пластинами материал — диэлектрик. Если, к примеру, заполнить бумагой весь объем между пластинами конденсатора, то емкость его удвоится. Если в качестве диэлектрика использовать слюду, то емкость

возрастет в семь раз. Такое возрастание емкости объясняется взаимодействием между электрическим полем конденсатора и молекулами диэлектрика. Подробнее об этих явлениях будет изложено ниже.

Для каждого диэлектрика можно определить постоянную, которая называется "относительной электрической постоянной" или "относительной диэлектрической проницаемостью". Она указывает, во сколько раз емкость данного конденсатора возрастает, если заменить воздух (точнее, вакуум) в пространстве между пластинами рассматриваемым диэлектриком.

$$\epsilon_r = \frac{\text{Емкость с диэлектриком}}{\text{Емкость без диэлектрика}} \quad \text{или} \quad \epsilon_r = \frac{C_{\text{диэл.}}}{C_{\text{вак.}}}$$

Значения относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$  некоторых изоляционных материалов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Материал	Значение $\epsilon_r$
Воздух [при 20°C и 1,013·10 <sup>5</sup> Па (760 мм рт. ст.) ]	1
Бумага	2
Кварц	4,5
Стекло, фарфор	5
Конденсатор F	80
Эпсилан	< 10 000

Приведенные в двух последних строках материалы были изготовлены специально для конденсаторов. Конденсатор необходим для многих целей в технике связи, радиотехнике, а также в электронике. Это привело к тому, что возникли многочисленные виды и типы конденсаторов. Здесь рассматриваются только некоторые.

В радиоприемниках нужны конденсаторы, емкость которых может изменяться. Это так называемые конденсаторы переменной емкости. Вместо обычных двух больших пластин применяются пакеты пластин из многих маленьких пластинок, которые, подобно двум гребенкам, входят друг в друга, не соприкасаясь, будучи разделенными воздушным зазором. Пакеты пластин могут заходить друг в друга на разную глубину, вследствие чего изменяется емкость.

Если хотят получить большую емкость (порядка микрофарадов) при возможно меньшем объеме, то используют так называемые "бумажные конденсаторы". Они состоят из двух лент металлической фольги, которые изолированы друг от друга слоем специальной бумаги и скатаны в плотный пакет.

В "металлобумажных конденсаторах" металлическая фольга заменяется чрезвычайно тонким слоем металла, который напыляется на бумагу с обеих сторон. Напыленный металл в месте пробоя сразу испаряется, изоляция восстанавливается и конденсатор "излечивается сам". Наилучшими электрическими свойствами обладает пленочный конденсатор, у которого бумага заменена пленкой, используемой в качестве диэлектрика.

Емкость в несколько десятков тысяч пикофарадов может быть получена в "керамических конденсаторах". Диэлектриком здесь служит тонкостенная керамика, втулка или трубка, на которую с обеих сторон наплавлен слой серебра.

Если требуются еще большие емкости — до тысяч микрофарадов, то применяют "электролитический конденсатор". Его "пластины" состоят из алюминиевой фольги и из электролита, следовательно жидкости (бумажная фольга обычно ее впитывает). Они разделены микроскопически тонким слоем окиси алюминия. Благодаря совсем малой толщине и высокой диэлектрической проницаемости этого слоя, очень высокая емкость приходится на мельчайшие поверхности "пластин". Так как окись алюминия как изолятор действует только в одном направлении, а в другом — ток пропускает, то электролитический конденсатор должен подключаться к источнику тока с учетом строгой полярности. При неправильном подключении он разрушается.

”Танталовые конденсаторы” являются электролитическими. Электроды для них спекаются из порошка тантала, а диэлектриком служит слой пятиоксида тантала. Они отличаются хорошими электрическими свойствами и малыми размерами, что отвечает требованиям современной электроники.

## МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

### Магнит и магнитное поле

Тысячелетия знают о свойстве руды магнитного железняка притягивать железо; об этом свидетельствуют сказания, предания и легенды.

Давно также известно, что сталь ”намагничивается”, соприкасаясь с магнитным железняком. Сталь превращается в магнит, точнее в ”постоянный магнит”; ее магнитные свойства мало изменяются со временем.

Если подвесить магнитный стальной стержень так, чтобы он мог легко вращаться вокруг вертикальной оси, то он постоянно будет стремиться к положению, близкому направлению север—юг. Если повернуть магнитный стержень на  $180^\circ$ , он опять установится в первоначальном направлении север—юг.

Из этого можно сделать заключение, что оба ”магнитных полюса” имеют различную природу. Конец магнита, обращенный к северу, назовем северным полюсом, а обращенный к югу, — южным.

Если приблизить друг к другу два стержневых магнита, то их оба северных и оба южных полюса будут отталкиваться друг от друга, в то время как северный и южный полюсы — притягиваться. Существует правило:

*Одноименные магнитные полюсы отталкиваются,  
а разноименные магнитные полюсы притягиваются.*

Если поднести кусок мягкого железа к магниту, то он тоже станет магнитным. Но этот магнетизм исчезает до незначительного остатка, если удалить железо от магнита.

Это явление называют *магнитной индукцией*. Она всегда возбуждает в мягкой стали северный полюс против южного полюса магнита, а против северного полюса — южный. Этим объясняется, почему мягкая сталь притягивается к обоим полюсам магнита: в магните и стали всегда противостоят друг другу разноименные магнитные полюсы.

Если делят магнит на части, то каждая часть становится полноценным магнитом с северным и южным полюсами. Если продолжают деление, то получают вновь маленькие полноценные магниты, но никогда не получают отдельно северный или южный полюс.

Представляется, что кусок стали состоит из очень большого числа ничтожно маленьких магнитов — так называемых "элементарных магнитов". В немагнитном материале они расположены беспорядочно относительно друг друга (рис. 24, а). Если кусок стали приблизить к магниту или магнитному железяку, то элементарные магнитики постепенно выровняются (рис. 24, б). Вследствие этого могут сразу проявиться внешние магнитные силы. В стали элементарные магнитики "поворачиваются" с трудом и устойчиво сохраняют свое положение. В магнитном железе, наоборот, элементарные магниты сначала легко поворачиваются, а после снятия магнитной индукции располагаются опять беспорядочно — магнетизм исчезает.

Эта теория может быть подтверждена экспериментально различными способами. Если постоянный магнит подвергают длительное время сильной тряске, то он частично размагничивается, так как многочисленные элементарные магниты

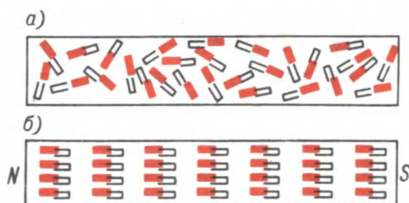


Рис. 24. Элементарные магнитики в немагнитном (а) и намагнитном (б) железе



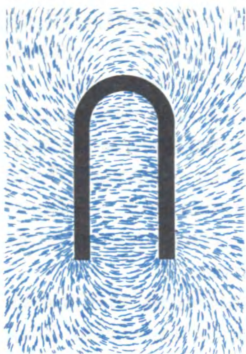


Рис. 25. Поле подковообразного магнита

”выбиваются” из преимущественной ориентации, поддерживавшей до этого намагниченность. С помощью специальной аппаратуры можно сделать слышимыми ”повороты” элементарных магнитов при намагничивании стального стержня.

Два известных явления также объясняются теорией элементарных магнитов. Если вывести железный стержень из области влияния магнита, то намагниченность его, вызванная индукцией, исчезнет не полностью, так как отдельные, более устойчивые элементарные магниты сохраняют первоначальную ориентацию. И, наоборот, невозможно повысить намагниченность стального стержня до любого значения. Если сориентировать одинаково почти все элементарные магнетики, дальнейшее намагничивание становится невозможным, сталь становится ”магнитно насыщенной”.

Область, в которой проявляется действие магнитных сил, называют *магнитным полем* (рис. 25). Здесь опять прибегают к представлению о магнитных силовых линиях, направление которых в каждой точке магнитного поля совпадает с направлением действующей силы.

Каждый знает, что наглядную картину этих линий, и тем самым магнитного поля, можно получить, если положить на магнит лист картона и посыпать железными опилками. При легком встряхивании листа частички железа выстроятся в характерные линии и цепочки. Эти цепочки появляются из-за того, что частички железа ориентируются под влиянием магнитной индукции и ”сцепляются” друг с другом. Если вместо

частичек железа установить множество маленьких магнитных стрелок, то получится аналогичная картина.

Картина поля считается законченной, если силовые линии начинаются у одного полюса магнита и заканчиваются у другого. Однако в противоположность линиям электрического поля, которые начинаются и заканчиваются у заряда, магнитные силовые линии являются замкнутыми линиями. Необходимо себе представить их продолженными также внутри магнита. Северный и южный полюсы магнита являются только местами выхода или входа силовых линий, но не началом и концом их.

Было решено также и магнитным силовым линиям придать определенное направление. Условились считать, что вне магнита силовые линии идут от северного полюса к южному. Северный полюс маленькой подвижной магнитной стрелки, которую вносят в поле магнита, указывает поэтому направление силовой линии, поскольку сила "искусственного" магнитного поля относительно больше силы "естественного" магнитного поля Земли. То обстоятельство, что силовые линии никогда не пересекаются и стремятся отдалиться друг от друга, можно объяснить по-прежнему наличием "сжатия", действующего перпендикулярно направлению силовой линии. Наоборот, притяжение разноименных магнитных полюсов указывает на "растяжение" в направлении силовых линий.

### **Магнитное поле электрического тока**

Датскому физику *Хансу Кристиану Эрстеду* (1777–1851) человечество благодарно за открытие, которое для техники имеет огромное значение. Эрстед установил, что стрелка компаса отклонялась в сторону каждый раз, когда находившийся вблизи проводник включали в электрическую цепь. Это отклонение не зависело от материала проводника, но зависело от силы тока.

Дальнейшие исследования показали: электрический ток порождает вокруг проводника магнитное поле (рис. 26). С помощью слоя магнитного порошка можно сделать явление наглядным и установить, что силовые линии в этом

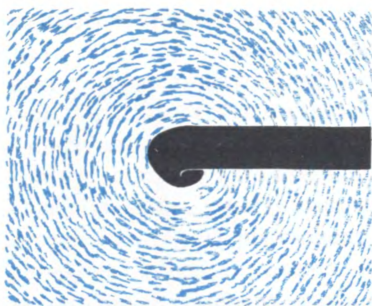


Рис. 26. Магнитное поле проводника с током

случае замкнуты и представляют собой концентрические круги вокруг проводника.

Магнитные полюсы в некотором смысле здесь отсутствуют. Направление же силовых линий, наоборот, сохраняется. Маленькая магнитная стрелка в этом поле указывает в каждой точке определенное направление, которое изменяется на  $180^\circ$  при перемене направления тока на обратное. Направление тока и направление силовых линий зависят друг от друга:

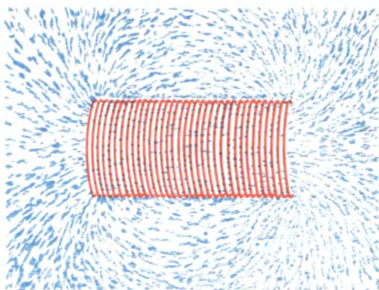
*Если смотреть по направлению тока, то силовые линии имеют направление вращения часовой стрелки.*

Это правило можно сформулировать и иначе:

*Если охватить проводник правой рукой так, чтобы отставленный большой палец указывал направление тока, то остальные пальцы расположатся по направлению силовых линий.*

Магнитные силовые линии отходят от каждого самого маленького отрезка провода. Если намотать провод на катушку, то отдельные магнитные поля отрезков провода и витков катушки составят результирующее поле, которое имеет вид, представленный на рис. 27. Картина поля соответствует полю магнитного стержня. Если длина катушки велика по сравнению с ее диаметром, то силовые линии внутри катушки располагаются параллельно и равномерно плотно. Поле внутри катушки является однородным.

Рис. 27. Магнитное поле катушки



Если подвесить подключенную к источнику тока катушку так, чтобы она могла свободно вращаться вокруг вертикальной оси, то она установится в направлении север—юг. При изменении направления тока на обратное катушка повернется на  $180^\circ$ .

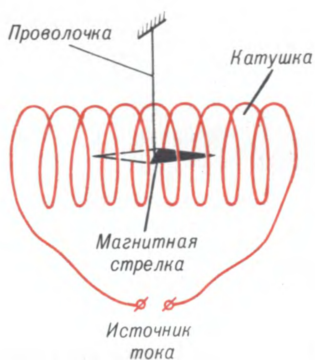
Оба конца катушки являются *полюсами* возникающего электромагнита. Положение северного и южного полюсов может определяться по следующему правилу:

*Наблюдатель, находящийся перед торцом катушки, видит южный полюс, если ток в витках протекает по направлению вращения часовой стрелки. Если же ток течет против вращения часовой стрелки, то наблюдатель находится перед северным полюсом.*

Естественно, что нельзя удовлетвориться только качественным описанием магнитного поля. Так как магнитное поле электрического тока играет исключительно важную роль в электротехнике, необходимо его точно рассчитывать и этими данными руководствоваться при проектировании.

Количественной характеристикой магнитного поля является напряженность (сила) магнитного поля, которая определяется действием его сил. Здесь ограничиваемся рассмотрением гомогенного поля, которое реализуется внутри длинной катушки.

Магнитную стрелку подвешивают на тонкой проволочке внутри катушки (рис. 28) и устанавливают при отсутствии тока в катушке так, чтобы она совпадала с ее продольной осью. Если включить ток, то возникшие силы стремятся



**Рис. 28.** Измерение напряженности магнитного поля с помощью магнитной стрелки

установить стрелку параллельно силовым линиям. Возникает момент вращения, который может компенсироваться скручиванием нити подвеса. Степень закручивания нити является мерой для определения момента вращения стрелки и тем самым напряженности магнитного поля внутри катушки.

Испытания при различной силе тока в катушках разной длины и с различным числом витков показывают, что напряженность магнитного поля возрастает с увеличением числа витков и силы тока. Четырехкратное увеличение силы тока и трехкратное увеличение числа витков (при неизменной длине катушки) дает двенадцатикратное возрастание напряженности поля, т.е. точно такое же, как и шестикратное увеличение тока при двукратном увеличении числа витков. Произведение значения силы тока на число витков играет важную роль. Эту физическую величину называют м.д.с. — магнитодвижущей силой (раньше называли ампер-витками). Катушка из 500 вит. при протекающем токе в 2 А характеризуется м.д.с., равной 1000 А (или 1000 а · в).

Если оставляют неизменной силу тока и число витков катушки, а увеличивают ее длину, растягивая витки, то напряженность поля падает обратно пропорционально длине катушки. Следовательно, напряженность можно выразить следующей зависимостью:

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

Силу тока  $I$  измеряют в амперах, длину катушки  $l$  — в метрах, напряженность магнитного поля  $H$  — в амперах на метр (число витков является безразмерной величиной).

**Пример.** В катушке, имеющей 250 вит. и длину 4 см при силе тока в 1,5 А, напряженность магнитного поля

$$H = \frac{1,5 \cdot 250}{0,04} = 9375 \frac{\text{А}}{\text{м}} = 93,7 \frac{\text{А}}{\text{см}}.$$

В негомогенном магнитном поле, так же как и в негомогенном электрическом поле, напряженность может определяться только в отдельной точке. Так как напряженность магнитного поля, как и электрического, является векторной величиной, то обозначается через  $\mathbf{H}$ , поскольку зависит не только от значения, но и от направления.

### Магнитные материалы

В формуле для напряженности магнитного поля поле характеризуется через причину, его вызывающую, т.е. через силу тока, который протекает по проводнику или катушке. Но можно найти для измерения магнитного поля и величину, связанную с силовой характеристикой магнитного поля. Это — *магнитная индукция*.

Если поместить внутри катушки (*катушки поля*) проводочную петлю (*индукционную катушку*), концы которой присоединить к чувствительному измерительному прибору (рис. 29), то прибор будет показывать отклонение каждый раз, когда ток будет включаться или отключаться в катушке поля. В индукционной катушке возникает короткий *всплеск напряжения* — *индуцируется* ток. Он характеризуется произведением напряжения и времени и измеряется в *вольт-секундах* (В · с)\*. Далее (см. стр.107) подробно рассматривается это чрезвычайно важное явление. Здесь же отметим, что

---

\* В системе СИ индукционный ток определяется изменением магнитного потока, при котором через поперечное сечение проводника проходит количество электричества 1 Кл в электрической цепи сопротивлением 1 Ом. Единица магнитного потока — вебер (Вб). (*Прим. перев.*)

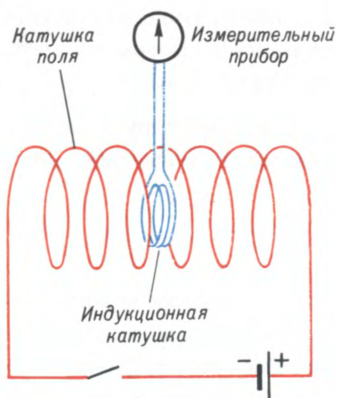


Рис. 29. Устройство, иллюстрирующее явление магнитной индукции

с помощью этого всплеска напряжения можно количественно описать магнитное поле. Магнитная индукция  $B$  рассчитывается на единицу площади поперечного сечения индукционной катушки. Магнитная индукция также является вектором; магнитное поле можно изобразить с помощью *силовых линий индукции*. Взаимосвязь между напряженностью магнитного поля и магнитной индукцией (в вакууме) выражается зависимостью:

$$B = \mu_0 H ,$$

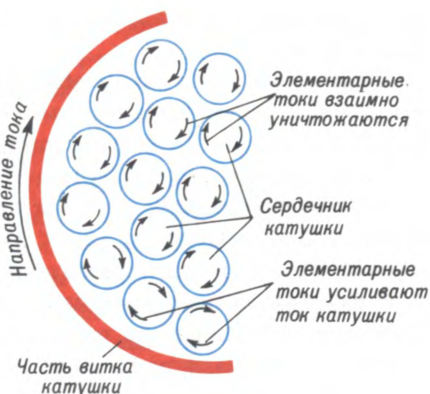
где  $\mu_0$  — *магнитная постоянная*:  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м (или  $\mu_0 = 125,6 \cdot 10^{-8} \frac{В \cdot с}{А \cdot м}$ ).

Метод нахождения численного значения  $\mu_0$  здесь для нас несуществен; легко рассчитаем значение постоянной, когда будем определять единицы для  $H$  и  $B$ .

Магнитный эффект включенной в электрическую цепь катушки усилится, если ввести в катушку железный стержень — так называемый *сердечник*. Сердечник оказывает такое же действие, как увеличение числа витков в катушке, т.е. увеличивает м. д. с.

Это становится понятным, если вернуться к теории элементарных магнетиков и предположить, что их магнетизм вызывается круговыми "элементарными токами" (рис. 30). Эти токи выравниваются током катушки так, что ориентируются

Рис. 30. Ориентированные  
элементарные токи



параллельно ему (см. стр.100). Внутри железного сердечник элементарные токи частично взаимно уничтожаются, снаружи, наоборот, они усиливают ток катушки.

Магнитная индукция снабженной сердечником катушки, следовательно, много больше "пустой" катушки. Чтобы влияние сердечника можно было выразить численно, ввели понятие *относительной магнитной проницаемости* :

$$\mu_r = \frac{\text{Индукция катушки с сердечником}}{\text{Индукция катушки без сердечника}}$$

Проницаемость  $\mu_r$  является безразмерной величиной и для вакуума (а практически и для воздуха) имеет значение, равное 1.

Теперь можно получить более общее выражение для зависимости между напряженностью поля и магнитной индукцией:

$$B = \mu_0 \mu_r H.$$

Материалы, у которых  $\mu_r$  существенно больше 1 и которые ведут себя, следовательно, подобно железу, называют *ферромагнитными*. Среди них, кроме железа, находится никель, кобальт и гадолиний (металл из группы редкоземельных). К ним примыкают многочисленные сплавы, специально



разработанные для нужд электротехники. У сплавов значение  $\mu_r > 100\,000$ .

Другие материалы также обладают магнитными свойствами, хотя и менее выраженными. Их относительная проницаемость близка к 1. Парамагнитные материалы ( $\mu_r > 1$ ), например эбонит, ведут себя как железо, хотя и в значительно ослабленной степени. Они втягиваются в магнитное поле. Диамагнитные материалы ( $\mu_r < 1$ ), например вода и медь, стремятся выйти из магнитного поля.

У ферромагнитных материалов относительная магнитная проницаемость зависит не только от вида материала, но и от напряженности магнитного поля. Если бы изобразили графически зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля для ферромагнитного материала, то при неизменной проницаемости должны были бы получить прямую линию. В действительности, однако, "кривая намагничивания" имеет иной вид: она сначала круто поднимается, затем изгибается и идет дальше полого (рис. 31). Напомним, что лежит в основе этого явления: если все элементарные магниты или элементарные токи сорентируются одинаково, то материал магнитно "насыщается".

Если после того, как железо намагнитится в магнитном поле, электрическую цепь разорвать, то намагниченность железа исчезнет не полностью, так как не все элементарные токи сразу разупорядочатся. Это свойство находит широкое применение на практике.

Если увеличить напряженность магнитного поля в ненамагниченном ферромагнитном материале, то получим для

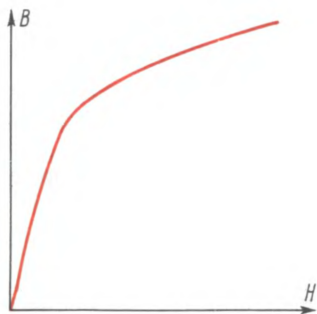


Рис. 31. Кривая намагничивания

индукции уже известную нам кривую намагничивания. Назовем ее "первичной кривой" из-за того, что она реализуется только тогда, когда материал не был предварительно намагничен.

Если уменьшить напряженность поля, уменьшится также и магнитная индукция. При измерении взаимосвязанных значений напряженности поля и индукции получают каждый раз разные кривые. При нулевой напряженности магнитного поля  $H$  всегда остается магнитная индукция  $B$ , которая на рис. 32 изображена отрезком между  $O$  и точкой пересечения петли гистерезиса с полуосью  $+B$ . Это — остаточная намагнитченность. Если теперь приложить определенную "отрицательную" напряженность поля, т.е. направленную противоположно, то индукция снизится до нуля. Необходимое для этого значение отрицательной напряженности поля называют "коэрцитивной силой"  $H_c$ . При дальнейшем увеличении отрицательной напряженности поля индукция также приобретет отрицательные значения. Таким образом, получили замкнутую кривую — *петлю гистерезиса*. Площадь замкнутой кривой соответствует затратам энергии, которые потребовались для перемагничивания материала. Эти гистерезисные потери играют особенно важную роль в технике переменного тока.

Потери на гистерезис тем меньше, чем меньше ограниченная петель площадь. Для магнитомягких материалов, например,

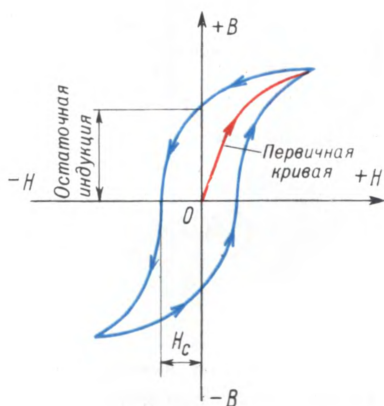


Рис. 32. Петля гистерезиса

получают очень узкую петлю гистерезиса; потери на гистерезис здесь незначительны.

Материалы с широкой петлей гистерезиса (магнитотвердые), наоборот, требуют на перемагничивание значительно больших затрат энергии. Они поэтому наиболее пригодны для постоянных магнитов.

### Электромагнитные явления в технике

Магнитные явления в электротехнике нашли широкое применение. Они используются в многочисленных приборах, аппаратах, машинах и вообще дают возможность осуществлять получение, передачу и преобразование электрической энергии в больших количествах.

Уже наблюдения Эрстеда за тем, как магнитная стрелка отклоняется под действием проводника с электрическим током, привели к созданию приборов для измерения электрического тока. В простейшем случае они состояли из катушки, внутри которой находилась стрелка компаса (рис. 33). Этот *гальваноскоп\** устанавливается так, чтобы магнитная стрелка была параллельна виткам катушки. Когда через катушку потечет ток, магнитное поле будет стремиться повернуть

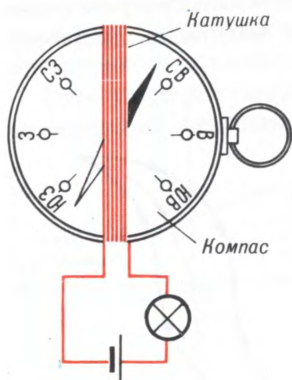


Рис. 33. Гальваноскоп на основе компаса

---

\* Гальваноскоп явился прообразом гальванометров — высокочувствительных электроизмерительных приборов. (Прим. перев.)

стрелку перпендикулярно виткам, т.е. в направлении силовых линий, в то время как магнитное поле Земли стремится удержать стрелку в первоначальном положении. Стрелка уравнивается этими силами в промежуточном положении, причем угол поворота зависит от силы тока в катушке. В усовершенствованных конструкциях гальваноскопов, которые регистрируют даже слабые токи, действие земного поля исключается и стрелка тормозится механической силой пружины.

Более мощными и относительно дешевыми приборами для измерения электрического тока являются *приборы с поворотным ферритовым сердечником* (рис. 34). Если внутри катушки уложить две пластинки из магнитомягкого железа, то они намагнитятся, когда через катушку потечет ток. Так как на рядом расположенных концах пластин возникают одноименные полюсы, то они отталкиваются друг от друга. Одна из пластин в приборе жестко закреплена, а другая — может вращаться и передвигать стрелку по шкале, преодолевая силу пружины. При перемене направления тока в катушке магнитные полюсы меняют место на обеих пластинах. Они отталкиваются друг от друга, как и до этого. Поэтому можно использовать прибор для измерения не только постоянного, но и переменного тока.

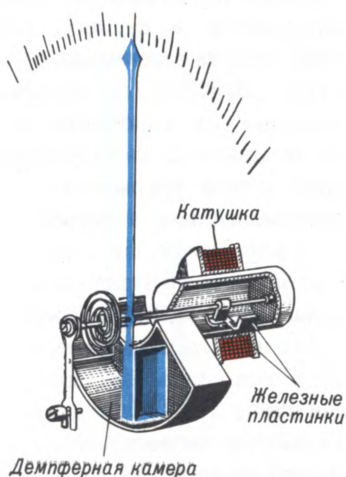


Рис. 34. Прибор с поворотным железным сердечником

Электромагниты применяются в технике для разнообразных целей. Прежде всего с помощью электромагнитов можно получать более высокую силу притяжения, чем с помощью постоянных магнитов. Но эта сила притяжения не остается неизменной, как у постоянных магнитов. Наоборот, она может регулироваться в широких пределах изменением силы тока в катушке магнита. Более того, что уже вовсе невозможно для постоянных магнитов, сила притяжения может возбуждаться или уничтожаться включением или отключением питающей электрической цепи. Наконец, электромагнитом можно управлять на большом расстоянии через соответствующие линии связи.

Формы изготовления электромагнитов определяются целями их применения. Поэтому, кроме магнитов в форме стержня и подковы, существуют магниты самой разнообразной формы.

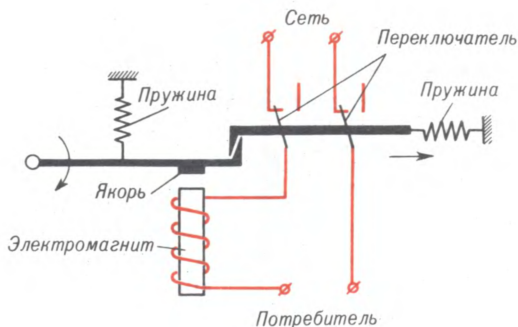
Грузоподъемные магниты оказываются чрезвычайно удобными для транспортировки ферромагнитных материалов. Особенно легко с помощью электромагнита перемещать рыхлый или громоздкий металлолом без специальной упаковки или вспомогательных устройств. Значительно меньшая сила притяжения необходима, чтобы привести в действие электромагнитный клапан, заслонку или запорный кран. Подобные магнитные распределительные устройства широко применяются в случаях, когда необходимо осуществлять управление на расстоянии.

При обработке на станках ферромагнитных деталей закрепление их упрощается и ускоряется, если применяют так называемую электромагнитную зажимную плиту, на которой детали удерживаются соответственно размещенными многочисленными электромагнитами.

Электромагнитное управление стрелками и семафорами на транспорте заменяет сложные механические, подверженные частым повреждениям передачи из канатных тяг.

Для защиты электрических устройств от коротких замыканий или слишком сильных токов используются ограничители силы тока. Они включают в себя электромагнит как важнейшую составную часть. На рис. 35 вблизи полюса электромагнита расположен ферромагнитный якорь, удерживаемый

Рис. 35. Электро-  
магнитный ограни-  
читель силы тока



пружиной на заданном расстоянии от магнитного полюса. В этом положении якорь жестко соединен с переключателем, который включен в цепь катушки магнита. Если сила тока превысит определенное критическое значение, притяжение станет настолько сильным, что преодолеет силу удерживающей пружины. Переключатель разомкнется, вторая пружина отведет его назад, цепь разорвется.

Так же работает электрический звонок (рис. 36). Когда нажимают кнопку звонка, через электромагнит протекает ток. Вследствие этого пружинный якорь притягивается, ток прерывается. Сила притяжения исчезает, якорь возвращается обратно, ток включается вновь, и все повторяется. На конце якоря крепится молоточек, который ударяет по чаше звонка при этих колебаниях.

Важнейшим элементом электротехники является *реле*. С его помощью можно слабым током включать сильный ток или осуществлять процессы переключения.

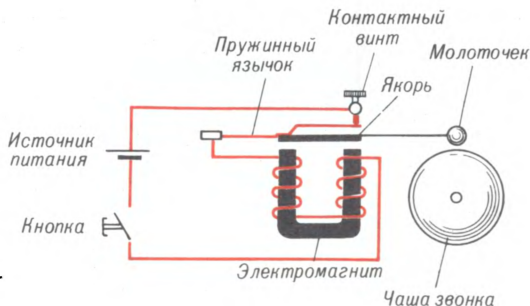


Рис. 36. Элек три-  
ческий звонок

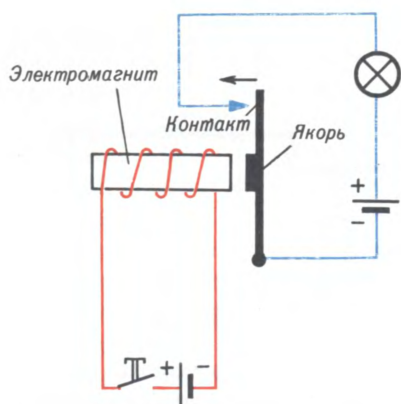


Рис. 37. Контактор включения

Магнитная катушка, которая иногда имеет много тысяч витков тонкого провода, питается слабым *управляющим током*. При этом она притягивает якорь, который, в свою очередь, включает замыкающий контакт. Реле входит в *схему рабочего тока* и в *схему цепи тока покоя*. В схемах рабочего тока цепь включается якорем в момент, когда управляющий ток протекает через магнитную катушку (рис. 37). Такая схема встречается, как правило, там, где используют слабые токи для включения сильных токов. Эту схему, между прочим, используют в цепях освещения многих современных жилищ, где цепь включается и отключается через контактор с помощью простых слаботочных кнопок.

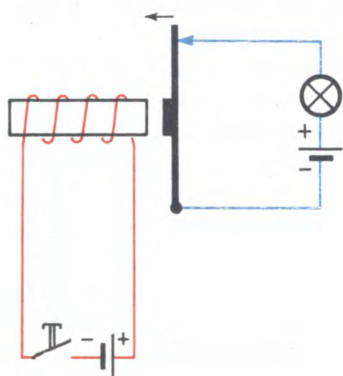


Рис. 38. Контактор отключения

В схемах цепи тока покоя, наоборот, цепь включается каждый раз, когда ток прерывается в катушке реле (рис. 38). Типичным примером применения схемы являются системы сигнализации о тревоге: если обрывается тонкая проволока или прерывается световой луч, то прерывается ток через катушку реле. Если якорь падает и замыкает второй контур, то включается устройство тревоги или защиты.

Так как якорь может замыкать одновременно много контактов, то с помощью реле можно на простой основе производить сложные переключения.

## Телеграф и телефон

Опыты по использованию электромагнитов для передачи сообщений возвращают нас к первой половине прошлого столетия. Американцу *Самуэлю Морзе* (1791–1872) благодарны мы за первый опыт телеграфной связи, которая смогла повсеместно распространиться и еще сейчас кое-где используется. Якорь силового электромагнита уподоблен самописцу (рис. 39). Каждый раз, когда якорь притягивается магнитным полюсом, смачиваемое чернилами *пишущее колесико* прижимается к узкой полоске бумаги, которая протягивается часовым механизмом или электродвигателем вблизи пишущего колесика. Если ток включается и отключается в ритме знаков Морзе, то пишущее колесико запишет на бумажной ленте эти импульсы тока в виде точек и тире.

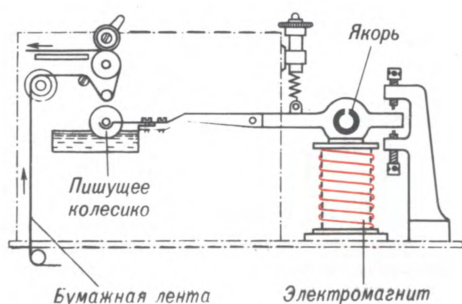


Рис. 39 Устройство самопишущего прибора



Телеграфная связь Морзе непрерывно совершенствовалась. Большие изменения претерпел и способ передачи. Существенное упрощение и удешевление произошло, когда, например, в качестве одного из двух проводников стали использовать электропроводность земли (рис. 40). Позднее удалось значительно увеличить количество телеграмм, одновременно передаваемых по проводнику в обоих направлениях. Благодаря внедрению реле и прокладке подводных кабелей удалось перекинуть "телеграфный мост" на огромные расстояния.

Но два существенных недостатка телеграфной связи Морзе оставались непреодолимыми: относительно низкая скорость передачи и необходимость каждый раз переводить буквы телеграммы сначала в знаки Морзе (точки и тире), а потом (в пункте назначения) — опять в буквы.

С самого начала стремились создать *буквопечатающий телеграфный аппарат*, т.е. устройство, у которого с передающей станции отправляется буквенный текст, а на станции приема записывается непосредственно также буквенный текст. Со временем создали много аппаратов, которые более или менее успешно решали эту задачу. Сегодня уже повсеместно используют буквопечатающие телеграфные аппараты — телетайпы.

Принцип его действия заключается в следующем: оба партнера имеют по телетайпу, он служит для передачи и для приема, оснащен типовым набором и клавиатурой, как пишущая машинка. Как только у "передатчика" нажимается рычаг буквы, сразу включается так называемый избирательный блок. Он выдает комбинацию импульсов, которая

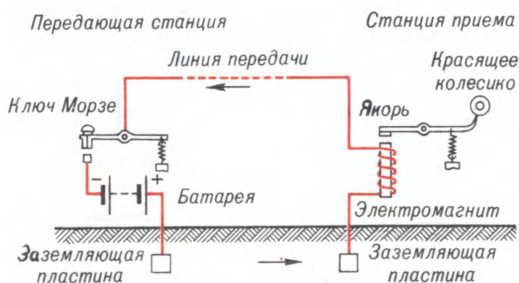


Рис. 40. Схема телеграфной связи

передается по линии передачи к "приемному механизму". Каждой букве и каждому знаку соответствует определенная комбинация.

В приемном механизме пришедшие импульсы включают с помощью электромагнита подобный же блок. Он реагирует, однако, не на любые импульсы, а на комбинацию их, соответствующую удару данной буквы. При передаче и приеме записываются, следовательно, одинаковые буквы.

Обслуживание буквопечатающего телеграфного аппарата (телетайпа) не требует особенной квалификации. Поэтому можно, как это в большинстве стран и делается, строить сеть телеграфирования (называемую ТЕЛЕКС-сетью), которая дает возможность любому участнику вступать в непосредственную телеграфную связь друг с другом. С помощью дополнительных устройств можно сохранять передачи в форме перфолент (бумажных полосок с отверстиями) для повторений или для отправки в более удобное время.

По другому принципу работает световой автомат. Здесь также передается комбинация импульсов. Они управляют на станции приема электромагнитом, который в ритме импульсов прижимает пишущую спираль к движущейся бумажной ленте. Импульсы, пишущая спираль и скорость машины так согласованы друг с другом, что на станции приема записываются блоки букв.

*Телефонный аппарат* тоже невозможен без электромагнита. Чтобы смонтировать его (рис. 41), необходим источник постоянного тока, линия связи, микрофон и телефон.

Микрофон состоит из облицованной углем капсулы, частично заполненной зернами угля. Капсула закрывается эластичной мембраной. Если говорить перед мембраной, то она

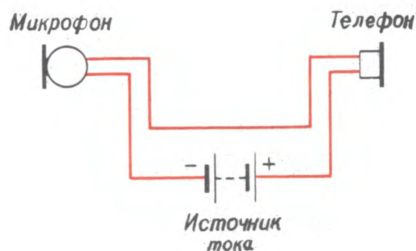


Рис. 41. Принцип действия телефонной связи

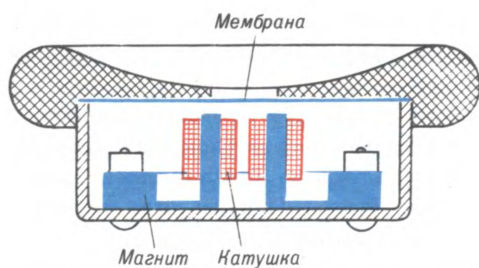


Рис. 42. Телефон в разрезе

сжимает в такт со звуковыми волнами угольные зерна в большей или меньшей степени. Соответственно колеблется сопротивление касания зерен в ритме звуковых волн. Если через капсулу микрофона пропустить постоянный ток, то сила его меняется тоже в ритме колебаний сопротивления и тем самым звуковых волн.

В телефоне (смотри рис. 42) колебания тока преобразуются в звуковые волны. Чтобы это осуществить, пульсирующий ток пропускают через магнитную катушку, поле которой соответственно то усиливается, то ослабевает. Вплотную к катушке прилегает тонкая железная мембрана. Она притягивается или освобождается в ритме тока катушки и приводит в колебание воздух. Так возникают вновь звуковые волны, которые может воспринимать ухо.

С помощью двух микрофонов, двух телефонов, источника тока и необходимого проводникового материала можно построить телефонную связь для переговоров в обоих направлениях (рис. 43). Эта связь годилась бы, однако, только для демонстрации принципа, а не для практических переговоров. Для практического применения этой схемы надо еще придумать много усовершенствований и дополнений.

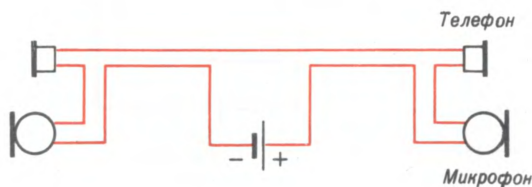


Рис. 43. Схема двусторонней телефонной связи

Так, например, необходимо решить проблему "вызова". С самого начала снабжали телефон "будильником" — электрическим звонком. Он соединялся с линией передачи при поднятой и при положенной трубке с помощью автоматического реле только тогда, когда переговоры на линии не велись.

Поскольку телефонная связь приобрела большое значение, то не могли уже удовлетворяться связью только между двумя абонентами. Потребовалось создать телефонную сеть, в которой были бы соединены между собой все абоненты и в которой любой абонент мог бы соединиться с другим.

На заре телефонии имелись только "ручные телефонные станции". От каждого абонента была проведена связь к центральной "станции". Когда абонент хотел позвонить по телефону, он поднимал "ручной аппарат", в котором объединены микрофон и телефон. На телефонной станции падал "клапан" абонента или вспыхивала лампочка. Телефонистка на станции спрашивала абонента о желаемом соединении. При этом она соединяла многожильным шнуром телефонное гнездо вызываемого с телефонным гнездом вызывающего. Отбой происходил тогда, когда трубка опускалась на рычаг по окончании разговора.

Эти принципы, которые используются в небольших устройствах и сейчас, не могли больше удовлетворять развивающуюся телефонную связь, поскольку заметно увеличилось число абонентов и ведущихся ими переговоров. Уже давно пробовали так автоматизировать станции, чтобы абонент мог сам выбирать нужного собеседника и соединяться с ним.

Эта цель достигается с помощью импульсов тока, которые абонент направляет на станцию. При этом используются два важнейших технических усовершенствования — *номеронабиратель* и *искатель*.

С помощью номеронабирателя получают импульсы тока, число и группировка которых соответствуют номеру вызываемого абонента. Если вращать диск с отверстиями для пальца до упора и возвращать обратно с помощью пружины, то движение передается "импульсному диску". При возврате диска соответственно набранной цифре происходит многократное прерывание контактов. Так возникают импульсы.

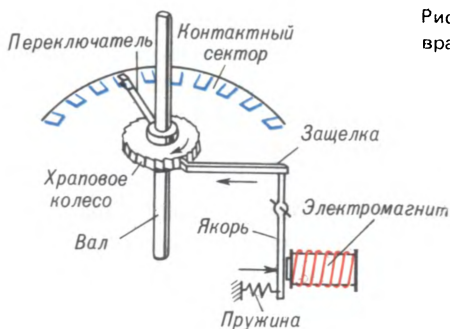


Рис 44 Принцип действия вращающегося искателя

При наборе нескольких цифр для вызова возникают группы импульсов.

Импульсы передаются по проводам на станцию и приводят в действие *вращающийся искатель* (рис. 44). Электромагнит, включенный в электрическую цепь, притягивает на короткое мгновение подвижный якорь. Якорь при этом продвигает толкатель храпового колеса, и оно поворачивается на один зубец. С храповым колесом связан переключатель. Его конец скользит по контактным пластинам, которые расположены на секторе окружности. Если электромагнит получает три импульса тока, то переключатель поворачивается до контактной пластины "3" и замыкает соединенный с ней контур. При шести импульсах переключатель переходит на контакт "6". Этот контакт включает абонента, фактически замыкая сразу много переключателей и контактных секторов, которые срабатывают одновременно. Техническая изобретательность обеспечила возврат искателя в исходное положение по окончании телефонного разговора.

С помощью вращающегося искателя можно осуществлять только десять соединений. *Декадно-шаговый искатель* расширяет возможности набора до 100 соединений.

В декадно-шаговом искателе объединены десять десятирядных контакторов. При поступлении первой группы импульсов (например, группы, состоящей из трех импульсов) срабатывает *магнит подъема*. Он поднимает искатель последовательными шагами до третьего ряда контактов. Следующие импульсы действуют на *вращающийся магнит* и поворачивают переключатель теперь уже в горизонтальном направлении.

При наборе "67", например, искатель сначала совершит шесть шагов по вертикали, а затем — семь шагов в горизонтальном направлении. По окончании разговора переключатель возвратится обратно в исходное положение.

Было бы нерационально, если бы каждому абоненту соответствовал "свой" сравнительно сложный декадно-шаговый искатель. Так как эти искатели одновременно в работе находятся в небольшом количестве (от 6 до 10%), то, как правило, обходятся значительно меньшим числом их: каждого абонента сначала обслуживает так называемый предыскатель, который при поднятом рычаге телефона автоматически разыскивает "свободный" декадно-шаговый искатель, обеспечивающий затем связь абонентов. При обслуживании более 100 абонентов подключаются несколько декадно-шаговых искателей друг за другом.

Недавно стали заменять искатели многократными *координатными соединителями*, принцип работы которых заключается в установлении соответствующего контакта в точке пересечения проводников соединяемых линий. Они могут одновременно осуществлять до 20 соединений.

Подразумевалось, что телефон даст возможность не только соединяться со многими абонентами, но и вести разговор на большом расстоянии. Очень скоро, однако, обнаружилось, что на линиях передачи большой протяженности телефонный сигнал так сильно ослабляется, что беседовать невозможно.

Благодаря изобретению *приемно-усилительной лампы — триода* (см. стр. 130) появилась возможность вести переговоры на большом расстоянии.

Но уже скоро существующие линии электропередачи перестали удовлетворять потребностям абонентов, так как длительность ожидания переговоров на большом расстоянии значительно снижала их пользу.

Высокочастотная техника, методы которой заимствованы из радиотехники, устранила эти трудности и дала возможность одновременно вести многочисленные переговоры по каналам связи. Она создала также предпосылки для широкого внедрения современных автоматических станций дальних телефонных переговоров.

## Взаимодействие магнитных полей

Постоянные магниты притягиваются или отталкиваются, если сближать разноименные или одноименные полюсы.

Так как безразлично, наводится ли магнитное поле постоянным магнитом или электрическим током, то обычно рассматриваются явления при протекании тока.

Если натянута два легкоподвижных провода параллельно друг другу и пропустить по ним ток одинакового направления от одного или разных источников тока, то проволоки сближаются (рис. 45). Между ними проявятся силы притяжения.

Если же в двух параллельных проводниках протекает ток в противоположных направлениях, то проводники отталкиваются. Притяжение и отталкивание легко объяснить с помощью силовых линий (рис. 46). При параллельных, одинаково направленных токах силовые линии между проводниками направлены навстречу друг другу — поле ослабляется. Вне проводника силовые линии направлены в одном направлении — поле усиливается. Поэтому проводники сближаются друг с другом. При параллельных проводниках, но противоположных по направлению токах силовые линии между проводниками параллельны и равнонаправлены — магнитное поле усиливается. Вне проводников, наоборот, происходит ослабление поля. В результате проводники отталкиваются друг от друга.

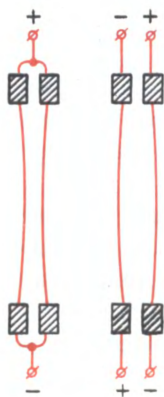


Рис. 45. Притяжение и отталкивание проводников при прохождении тока

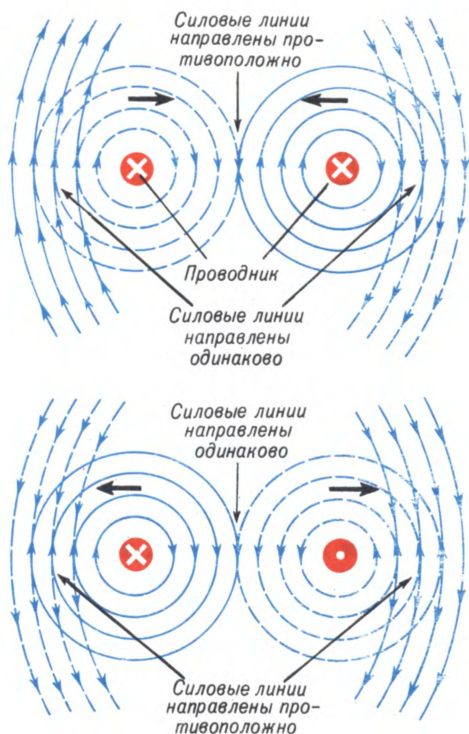


Рис. 46. Расположение магнитных силовых линий вокруг проводников, изображенных на рис. 45

Силы, действующие между параллельными, находящимися под током проводниками, проявляются в промышленных устройствах. Так, при коротких замыканиях в параллельно расположенных проводниках при определенных обстоятельствах могут возникать из-за большой силы тока значительные механические напряжения. Витки катушек, по которым протекают очень большие токи, должны тщательно укладываться, чтобы возникающие между витками силы не могли нарушить их положения.

Наконец, единица силы тока ампер (А) определяется силами притяжения, действующими между двумя параллельными проводниками.



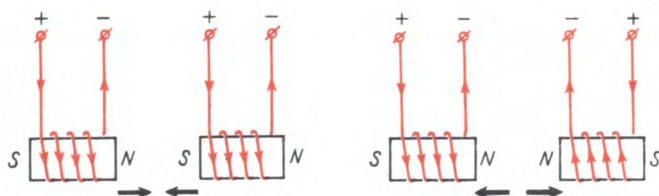


Рис. 47. Силы притяжения и отталкивания между катушками при прохождении тока

Рассмотрим теперь взаимодействие двух катушек (рис. 47). Так как их магнитные поля почти полностью соответствуют полю постоянного магнита в виде стержня, то два конца катушек притягиваются, если у них возникают разноименные полюсы. Они отталкиваются, если образуются одноименные полюсы.

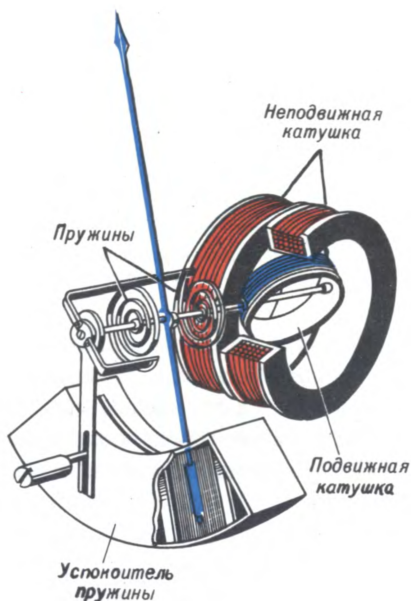
Так как положение магнитных полюсов зависит от направления движения тока, то можно сказать: две катушки притягиваются друг к другу, если в обеих ток течет в одинаковом направлении, и отталкиваются друг от друга, если ток течет в них в противоположных направлениях.

Если закрепить обе катушки так, чтобы они могли поворачиваться, то катушки установятся параллельно, причем ток в обеих катушках будет течь в одном направлении.

Действующий между двумя катушками момент вращения используется в *динамометрических устройствах* для измерения тока, напряжения и мощности. Они состоят из неподвижной катушки, в которой находится подвижная катушка (рис. 48). В исходном состоянии эта катушка удерживается пружиной в поперечном положении относительно неподвижной катушки. При последовательном или параллельном включении в электрическую цепь обеих катушек подвижная катушка стремится стать параллельно неподвижной. Так как этому повороту препятствуют пружины, то отклонение стрелки, расположенной над шкалой и связанной с подвижной катушкой, характеризует силу тока.

Если изменить направление тока на обратное, то оба магнитных поля изменят направление, а момент вращения останется неизменным. Поэтому динамометрические измерительные

Рис. 48. Динамометрическое измерительное устройство



приборы могут использоваться для измерения и переменного тока.

Момент вращения, возникающий на оси подвижной катушки, пропорционален произведению силы тока в неподвижной катушке и силы тока в подвижной. Если обе катушки питают независимыми друг от друга токами, то прибор может использоваться для измерения произведения этих двух токов.

Электрическая мощность, например, является произведением силы тока и напряжения. Если подключить динамометрический измерительный прибор у потребителя так, как показано на рис. 49, то через неподвижную катушку прибора потечет потребляемый ток. Если сопротивление подвижной катушки велико, т.е. если ее обмотка состоит из большого числа витков тонкого провода, то эта катушка находится практически под имеющимся у потребителя напряжением, которое вызывает по закону Ома соответствующий ток. Шкала динамометрического измерительного устройства при этом может градуироваться непосредственно в единицах мощности.

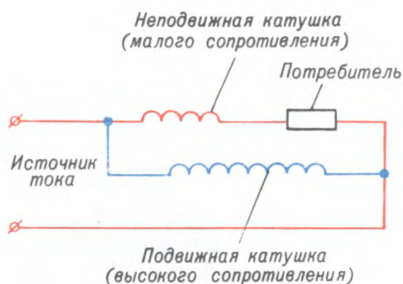


Рис. 49. Схема включения динамометрического прибора для измерения мощности

На прямолинейный отрезок проводника с током (рис. 50) будут воздействовать механические силы, если внести его в постоянное магнитное поле.

Эти явления также объясняются взаимодействием неподвижного магнитного поля и магнитного поля движущегося проводника. Известно, что на одной стороне проводника силовые линии обоих полей (рис. 51) имеют одинаковое направление — общее поле "уплотняется". На другой стороне проводника, наоборот, силовые линии направлены встречно — общее поле ослабляется. В результате возникает сила давления, которая толкает проводник к менее "плотным" участкам поля. Значение этой силы зависит от напряженности неподвижного поля, от длины проводника в магнитном поле и от силы протекающего тока.

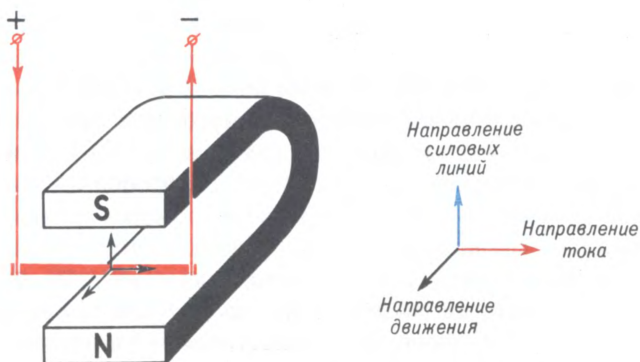
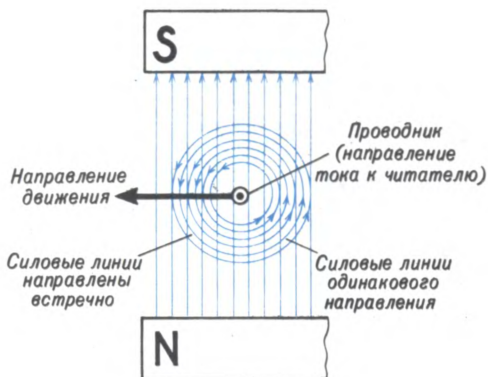


Рис. 50. Отрезок проводника в поле постоянного магнита

Рис. 51. Ход силовых  
линий для схемы  
рис. 50



Это явление лежит в основе работы всех электродвигателей. Поэтому правило, с помощью которого в данном случае определяют направление движения проводника, называют *правилом двигателя* или *правилом левой руки* (рис. 52):

*Если левую руку держать так, чтобы силовые линии входили в ладонь, а сложенные пальцы совпадали с направлением тока, то отогнутый большой палец укажет направление движения проводника.*

В качестве прибора для демонстрации сил, возникающих у проводников с током в магнитном поле, использовалось долгое время *колесо Барлова* (рис. 53). Оно состоит из легко вращающегося металлического колеса, к которому через ось подводится ток. Часть обода колеса погружена в ванночку с электрически проводящей жидкостью, через которую

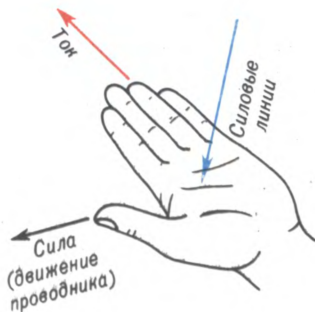


Рис. 52. Правило левой руки

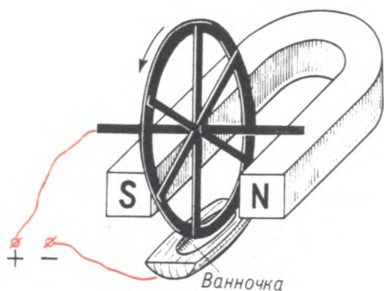


Рис. 53. Колесо Барлова

протекает ток. Часть колеса помещена между полюсами сильного постоянного магнита. Как только включается ток, возникает механическая сила, приложенная к спице, находящейся в магнитном поле при данном положении колеса. Сила сообщает спице движение, колесо начинает вращаться. Направление движения можно заранее определить по "правилу левой руки".

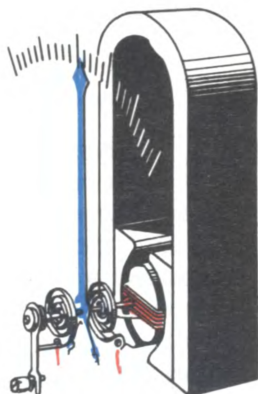
Пытались усовершенствовать колесо Барлова, с тем чтобы использовать его в качестве электродвигателя. Опыты в этом направлении оказались успешными. Двигатель, построенный на этом принципе, отличался особенной простотой. Его вращающаяся часть — *ротор* — состояла из изоляционных пластин, обтянутых металлической шиной (как и спицы). Так же компактно могут выполняться и магниты, легко заменяемые электромагнитами. Двигатель напоминает снаружи плоскую, закругленную коробку.

Для электротехники особенно важно знать влияние постоянного магнитного поля на подвижную катушку. На рис. 54 видно, что в соответствии с "правилем левой руки" левая ветвь катушки отклоняется вверх, а правая ветвь — вниз. На катушку действует вращающий момент, значение которого (если все другие параметры остаются неизменными) зависит от силы тока в катушке. Этот принцип используется в работе



Рис. 54. Вращение витка катушки в магнитном поле

Рис. 55. Устройство магнитоэлектрического прибора



электродвигателей. Ниже это будет рассмотрено более подробно.

На этом принципе работают широко распространенные измерительные *магнитоэлектрические приборы*. Между полюсами постоянного магнита помещают подвижную катушку (рис. 55), по которой протекает измеряемый ток. Витки катушки приобретают вращающий момент, который зависит от силы тока. Две спиральные пружины удерживают катушку от вращения, с тем чтобы связанная с ней стрелка прибора занимала на шкале нулевое положение. Вследствие этого прибор показывает соответствующие отклонения силы тока.

Если изменить направление тока на противоположное, то изменится направление вращения катушки при неизменном направлении магнитного поля. Поэтому магнитоэлектрический прибор может включаться только при определенной полярности. Он используется исключительно при измерениях постоянного тока.

## ЯВЛЕНИЯ ИНДУКЦИИ

### Получение тока методом индукции

В предыдущем разделе было показано, как магнитное поле и электрический ток вызывают движение проводника. Естественно испытать и обратный процесс, т.е. возбудить электрическое напряжение или ток движением проводника в магнитном поле. Уже *Майкл Фарадей* (1791–1867) занимался этой проблемой и открыл фундаментальные законы и явления, в частности *электромагнитную индукцию* – получение напряжения с помощью магнитного поля. Явления индукции лежат сегодня в основе производства электроэнергии во всем мире.

Если соединить концы нескольких проволоочных витков с чувствительным вольтметром (рис. 56) и к этим виткам приблизить магнит, то стрелка прибора отклонится от нулевого положения. При удалении магнита стрелка прибора отклонится в противоположную сторону. Если магнит неподвижен, то стрелка прибора остается в нулевом положении, т.е. напряжения не возникает, на каком бы расстоянии от катушки он ни находился.

Если закрепить магнит и приближать или удалять катушку, то наблюдается тот же эффект. То же самое произойдет, если постоянные магниты заменить электромагнитами – в простейшем случае катушками с током (рис. 57). Даже если эти катушки (заменяющую магнитный стержень катушку возбуждения и индуктивную катушку) сдвинуть относительно друг друга, то возникнет напряжение.

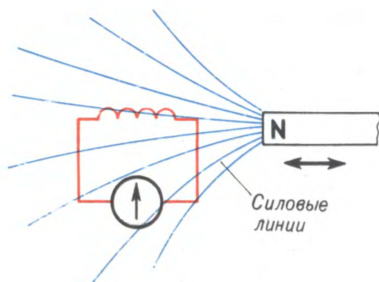
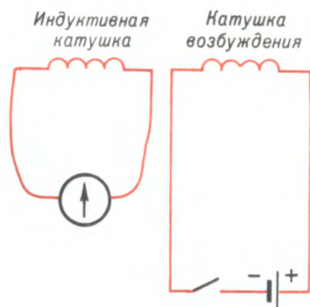


Рис. 56. Классический опыт, иллюстрирующий явление электромагнитной индукции (силовые линии)

Рис. 57. Электромагнитная индукция в двух соседних катушках



На первый взгляд, кажется, будто передвижение катушек вызывает появление тока индукции. Можно, однако, легко убедиться в том, что это не так. Если укрепить обе катушки, как указано, и включать и отключать ток в катушке возбуждения, то каждый раз можно наблюдать появление напряжения в индуктивной катушке.

Из этого опыта следует, что движение катушек не может быть причиной появления тока индукции. Чтобы отыскать причину, следует найти то общее, что есть во всех опытах. Уже из рис. 56 и 57 можно установить:

*При приближении или удалении магнитного стержня или катушки изменяется число силовых линий, которые "охватываются" катушкой. Их число увеличивается при приближении и уменьшается при удалении.*

Так же и в других опытах изменяется число охваченных силовых линий: если включать или отключать электрическую цепь с катушкой возбуждения, то прежде "свободная" от силовых линий катушка вдруг заполняется силовыми линиями, которые при включении вновь исчезают.

Значение индуцированного напряжения зависит от скорости, с которой меняется число охваченных силовых линий. Чем больше эта скорость, тем выше индуцированное напряжение. Это положение можно легко подтвердить опытами с меняющейся скоростью и с магнитными полями различной силы.

При некоторой скорости изменения числа силовых линий в равной мере изменяется напряжение, как и при изменении



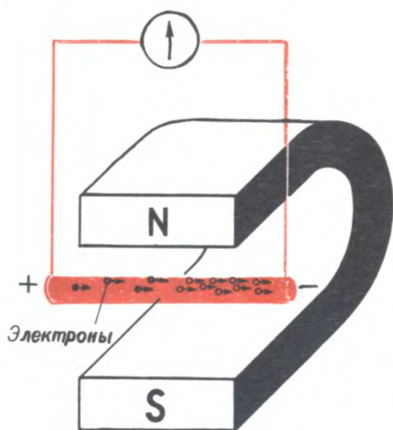


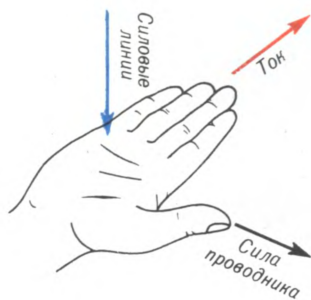
Рис. 58. Возникновение тока индукции

числа витков индуктивной катушки, так как соответствующие напряжения в отдельных витках суммируются. Можно, следовательно, получить очень высокое напряжение соответствующим увеличением числа витков. Для увеличения индуктивности применяют катушки с ферритовыми сердечниками.

Индукционный ток возникает также, если перемещать прямолинейный отрезок проводника "поперек" магнитного поля (рис. 58). Если двигать проводник в магнитном поле "назад", то находящиеся в проводнике электроны проводимости должны принять участие в этом движении. Движущиеся "назад" вместе с проводником электроны подпадают под действие сил, о которых говорилось выше при рассмотрении воздействия магнитного поля на проводник с током. По "правилу левой руки" следует, что электроны отклоняются вправо — левая часть проводника обедняется, в то время как у правого конца образуется избыток электронов. А это означает, что на концах проводника возникает разность потенциалов. Она может вызвать появление тока.

Чтобы определить направление возникающего тока, не обязательно каждый раз воссоздавать процесс возникновения тока. Проще запомнить *правило генератора*, или *правило правой руки* (рис. 59):

Рис. 59. Правило правой руки



*Если правую руку расположить так, чтобы силовые линии входили в ладонь, а большой палец указывал направление движения проводника, то вытянутые пальцы укажут направление тока.*

Возникающий индукционный ток, как всякий ток, может совершать работу. Она происходит от механической работы, которую затратили на движение проводника. Обычно указывается, что при этом движении преодолевается механическое сопротивление. Это происходит потому, что протекающий в движущемся проводнике индукционный ток создает магнитное поле. Взаимодействуя с уже имеющимся магнитным полем, это поле всегда направлено так, чтобы препятствовать движению проводника, в котором протекает индукционный ток. Этот важный закон для всех областей индукционных явлений впервые был открыт русским физиком *Эмилием Христиановичем Ленцем* (1804–1865). "Правило Ленца" гласит:

*Любой индукционный ток направлен так, что его поле препятствует тому изменению потока магнитной индукции, которое вызывает данный ток.*

Можно выразить это правило проще:

*Индукционный ток всегда противодействует причине его возникновения.*

В нашем случае движение отрезка проводника является причиной возникновения индукционного тока. Возбуждаемое им поле при этом направлено так, чтобы во взаимодействии с полем постоянного магнита препятствовать движению

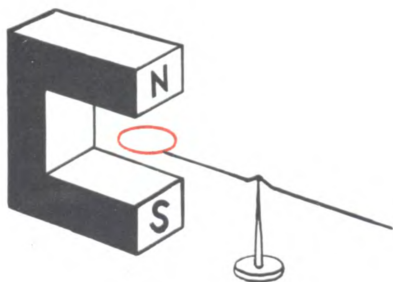


Рис. 60. Опыт, иллюстрирующий правило Ленца

проводника. Для того чтобы проводник двигался, несмотря на противодействующую силу, необходима энергия. Эта энергия эквивалентна мощности тока индукции.

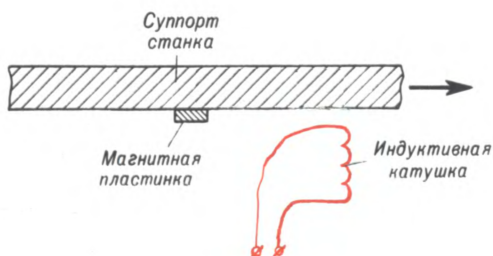
Справедливость "правила Ленца" можно продемонстрировать простым опытом (рис. 60): если приближать кольцо из меди или алюминия, снабженное легко поворачивающимся рычагом, к сильному магниту, то кольцо будет выталкиваться магнитом. При приближении в кольце возникает индукционный ток. Его магнитное поле стремится противодействовать причине индукции, стремится опять увеличить расстояние до магнита. Если, наоборот, выводить кольцо из межполюсного пространства, то кольцо будет удерживаться магнитом. Теперь причиной индукции является увеличивающееся расстояние. Эта причина исчезает, если кольцо будет двигаться вместе с магнитом.

### Применение явлений индукции

Явления индукции находят важные применения при получении и использовании электроэнергии. Остановимся на некоторых из них.

Если продвигать толстую намагниченную пластину над катушкой, то в катушке возникает импульс напряжения. Его можно использовать для управления некоторыми процессами (рис. 61). Если, например, необходимо, чтобы суппорт станка или тележка мостового крана при возвратно-поступательном движении в конце пути самостоятельно

Рис. 61. Принцип управления с использованием электромагнитной индукции



останавливались или меняли направление движения, то следует установить у электромеханического *концевого выключателя* устройство, действие которого основано на принципе индукции. На суппорте станка или тележке крана устанавливается пластинка из магнитного материала так, чтобы в момент, когда желательное переключение, она проходила над катушкой. Индуцируемый импульс напряжения управляет реле или электронным устройством, которое меняет направление движения суппорта или останавливает тележку крана.

Чтобы определить значение или изменение магнитного поля Земли, используют так называемый земной индикатор. Он представляет собой не что иное, как катушку, которая вращается около горизонтальной или вертикальной оси и соединена с соответствующим измерительным прибором. Катушка пересекается силовыми линиями магнитного поля Земли. Если катушка поворачивается, то изменяется число проходящих через нее силовых линий. По индуцированному напряжению можно рассчитать характеристики магнитного поля Земли. Вращение около горизонтальной оси дает при этом вертикальную компоненту магнитного поля, а вращение вокруг вертикальной оси — горизонтальную.

Если укрепить на вращающемся валу намагниченную пластинку так, чтобы она при каждом обороте проходила у индуктивной катушки, то амплитуда и частота повторения возникающих импульсов напряжения зависят от частоты вращения вала. Можно измерить частоту вращения и установить указатель на любом желательном расстоянии от вращающегося вала.

Как необходимые составные части телефонной связи выше назывались телефон и микрофон. В первых телефонных аппаратах, правда, не было микрофона. В них телефон использовался для приема и для разговора. Если говорить в мембрану телефона, то она колеблется в ритме звуковых волн. В таком же ритме меняется поле постоянного магнита, находящегося в телефоне, где индуцируются напряжения, соответствующие первоначальному звуковому колебанию. Напряжения эти относительно малы. И это также явилось причиной введения микрофона в телефонный аппарат.

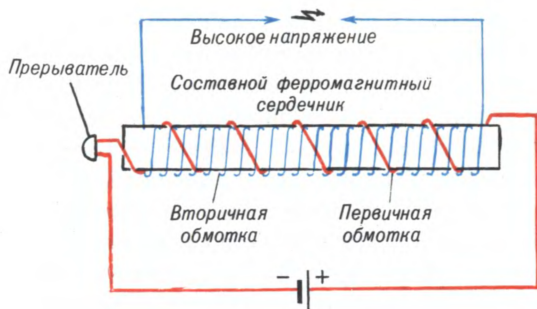
Только с появлением техники радиовещания обратились к *электродинамическому принципу* преобразования звуковых колебаний в электрическое напряжение. Был создан так называемый ленточный микрофон. Между полюсами сильного постоянного магнита натягивается гофрированная, легкоподвижная металлическая фольга. Если говорить, приблизив губы к фольге, то она изгибается в ритме звуковых волн, т.е. движется в магнитном поле. При этом индуцируется напряжение, которое соответствует звуковым волнам.

Напряжение ленточного микрофона очень мало. Намного большие напряжения дает сконструированный на подобном же принципе *электродинамический микрофон*, или "микрофон с погруженной катушкой". Под действием звуковых колебаний легкая подвижная катушка погружается в магнитное поле в большей или меньшей степени. Возникают индукционные напряжения, которые могут усиливаться.

Уже с середины прошлого века индукционные явления использовались при изготовлении *искровых индукторов*, с помощью которых удавалось создавать очень высокое напряжение.

На рис. 62 изображен сердечник из магнитомягкого железа, на котором расположены две обмотки: *первичная обмотка*, состоящая из малого числа витков толстого провода, и *вторичная обмотка*, которая имеет тысячи витков тонкого провода. Первичная обмотка соединяется с источником тока и *прерывателем*. Прерыватель обычно представляет собой не что иное, как механизм электрического звонка (см. стр.89), который периодически включает и отключает ток

Рис. 62 Схема  
искрового ин-  
дуктора



С таким же интервалом в сердечнике искрового индуктора с большой частотой возникает и исчезает магнитное поле. Во вторичной обмотке возбуждается очень высокое индуцированное напряжение.

Широкое распространение искровой индуктор получил в системах зажигания автомобиля — в прерывателе-распределителе. С помощью прерывателя в катушке зажигания возникает и исчезает ток, поступающий от аккумулятора машины. Вторичная обмотка катушки зажигания вырабатывает вследствие этого высокое напряжение (до 20 кВ), которое подается через распределитель на свечи зажигания. Между электродами свечи проскакивает искра, которая зажигает горючую смесь.

Явления индукции используются также в технике магнитофонов. Магнитная лента состоит из пластмассовой основы, на которую тонким слоем нанесен ферромагнитный порошок. При записи магнитная лента проходит через *записывающую головку*, которая представляет собой электромагнит. В нем возбуждается ток, соответствующий звуковым колебаниям.

Если надо осуществить воспроизведение записи, магнитную ленту пропускают через воспроизводящую головку. Она подобна записывающей головке. В ее катушке индуцируются напряжения, которые соответствуют звуковым колебаниям, записанным на магнитной ленте. Они усиливаются и подаются на громкоговоритель.

Техника магнитной записи используется не только в радиопередачах, но и заменяет применявшиеся до сих пор способы прямой "консервации" звуков. Уже несколько лет она

используется также для записи телевизионных передач и, может быть, решит проблему записи и воспроизведения кинофильмов. Магнитная лента нашла широкое применение также в автоматике и вычислительной технике. Можно накапливать на магнитных лентах сложные программы управления или запасы данных. Используя переменное магнитное поле, можно осуществить стирание записи, чтобы лента стала свободной для записи новой информации. Кроме того, магнитные ленты можно разрезать и вновь склеивать так, чтобы создавать различные комбинации из накопленной информации.

### Вихревые токи

Явления индукции наблюдаются не только в проводниках, но и в каждом проводящем материале, когда изменяется число силовых линий, пересекающих его. Это можно показать с помощью простого опыта.

Между полюсами электромагнита подвешен маятник (рис. 63), цельный корпус которого сделан из жести. Пока ток не включен, маятник качается свободно. Если включить ток, произойдет торможение движения маятника. Он движется между полюсами электромагнита, как в вязкой жидкости, и чаще всего уже при первом качании приходит к покою.

Как объяснить это явление? Магнитное поле индуцирует напряжение в движущейся жести. Это напряжение в жести

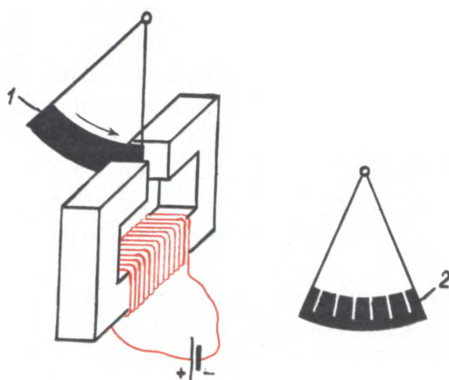


Рис. 63. Схема устройства, в котором цельный маятник 1 тормозится сильно, а маятник 2 с надрезами — слабо

порождает ток, который благодаря большому сечению проводника может достигать значительной силы и нагревать жести. Этот ток называется *вихревым током*. По правилу Ленца магнитное поле вихревого тока направлено так, чтобы уничтожить причину его возникновения, т.е. движение жести. Этим объясняется замедление движения в магнитном поле.

Вихревые токи в технике, как правило, крайне нежелательны. Они возникают во всех проводящих ток деталях машин, которые находятся внутри или вблизи катушек с изменяющимся магнитным полем. Так, например, вихревые токи возникают во всех катушках при питании их переменным током, а также в металлических деталях, которые вращаются в магнитном поле. Образующаяся при этом теплота повышает температуру машин. Вихревые токи снижают к.п.д. устройств, так как преобразуемая в теплоту энергия отбрасывается от энергии, подводимой к этому устройству.

Поэтому чаще всего стремятся по возможности снизить потери от вихревых токов. Наиболее простым решением является уменьшение массы электрических установок. Но это выполнимо всегда только в известной мере. Опыт с маятником указывает на другую возможность снижения действия вихревых токов.

Если проделать в жести маятника многочисленные параллельные надрезы (рис. 63), то он будет раскачиваться и при включенных электромагнитах почти беспрепятственно. Благодаря надрезам удлиняются пути тока. Сопротивление возрастает, и сила вихревых токов значительно снижается. С этой целью в электрических машинах и аппаратах детали, пронизываемые силовыми линиями, делают "слоистыми". Они состоят из тонких, изолированных друг от друга листов, причем подбирают материалы с высоким сопротивлением.

Однако иногда в технике сознательно используют явление возникновения вихревых токов. Стрелка измерительного прибора обычно долго раскачивается, прежде чем установится на окончательном значении. Устраняют это введением в систему *демпфера вихревого тока*. При движении стрелки сегмент жести проходит между двумя магнитными полюсами, близко стоящими друг к другу. Вследствие этого возникающие вихревые токи быстро затормаживают стрелку.



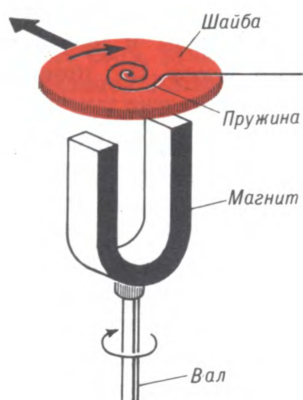


Рис. 64. Принцип действия тахометра на вихревом токе

Чтобы определить мощность машины, можно укрепить электромагнит над ободом маховика. Ставят магнит на подвижное плечо рычага. Вследствие проявляющихся вихревых токов магнит "захватывается" (см. стр. 110). Из этого можно сделать вывод о степени мощности машины.

Подобный метод применен в *тахометре на вихревом токе* (рис. 64) для измерения частоты вращения. Перед поворачивающейся металлической шайбой вращается постоянный магнит, закрепленный на контролируемом валу.

По правилу Ленца вихревые токи стремятся вовлечь во вращение шайбу. Но это невозможно, так как вращению шайбы препятствует пружина. Поэтому шайба только поворачивается на определенный угол. Он является мерой частоты вращения вала и измеряется по шкале.

### Самоиндукция

Если размыкают электрическую цепь, в которую включены катушки с большим числом витков и с сердечниками из железа, например электромагнитами, то у выключателя вспыхивает сильная дуга, которая ускоряет износ контактов выключателя. Наоборот, при включении устанавливают, что ток не сразу и не в полную силу возникает, а доходит до рабочего значения постепенно.

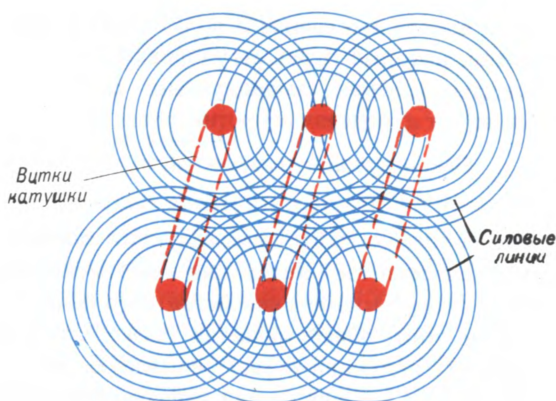


Рис. 65. Поля самоиндукции

Оба явления имеют одну причину — так называемую *самоиндукцию*. Рассмотрим рис. 65. Если замкнуть электрическую цепь, возникает магнитное поле. Каждый отрезок проводника, каждый виток катушки "порождает" в известной мере магнитные силовые линии. Они пронизывают другие витки катушки и вызывают в них индукционный ток. Каждый виток индуцирует э.д.с. в каждом другом витке. Вновь обратимся к правилу Ленца. При замыкании цепи ток самоиндукции должен быть направлен так, чтобы он "действовал против причины своего возникновения", т.е. против вызвавшего ток магнитного поля. Поэтому при замыкании цепи появляется противо-э.д.с. Она уменьшает действующее в катушке напряжение. Этим объясняется то, что при замыкании цепи ток возрастает постепенно и достигает значения, рассчитанного по закону Ома, только при "установившемся" магнитном поле.

При размыкании цепи соотношения меняются. Магнитное поле "разрушается", исчезает. При этом витки катушки опять пересекаются силовыми линиями, что порождает ток самоиндукции. Этот ток должен противодействовать причине своего появления в соответствии с правилом Ленца, поэтому он стремится поддержать исчезающее магнитное поле. При размыкании цепи ток в магнитной катушке и ток самоиндукции имеют одинаковое направление. Этот ток вызывает электрическую дугу.

Если вместо выключателя подключить к цепи переменный резистор, который будет регулировать силу тока, то можно наблюдать явление самоиндукции: сила тока в катушке "отстает" от изменения сопротивления, т.е.

*Самоиндукция противодействует каждому изменению силы тока.*

Следовательно, э.д.с. самоиндукции зависит от скорости изменения силы тока в цепи, так как эта скорость определяет также и скорость изменения магнитного поля.

Кроме того, обнаруживается также, что и сама катушка в явлениях индукции играет решающую роль. Прежде всего ясно, что э.д.с. самоиндукции увеличивается с числом витков катушки. Она зависит также от того, каков диаметр и какова форма катушки и содержит ли она железный сердечник.

Учитывая все эти данные катушки, получают постоянный коэффициент, на который умножают скорость изменения силы тока и получают э.д.с. самоиндукции. Этот коэффициент называют *индуктивностью* катушки. В системе СИ индуктивность измеряют в генри (Гн). Эта единица названа в честь американского физика *Джозефа Генри* (1797—1878), впервые открывшего явление самоиндукции.

Катушка обладает индуктивностью в 1 Гн, если при изменении силы тока на 1 А в 1 с в ней индуцируется напряжение в 1 В:

$$1 \text{ Гн} = \frac{1 \text{ В}}{1 \frac{\text{А}}{\text{с}}} = \frac{1 \text{ В} \cdot \text{с}}{1 \text{ А}} = \frac{1 \text{ В} \cdot \text{с}}{1 \text{ А}}$$

Так как эта единица для практического применения очень велика, то ввели дольные единицы — *миллигенри* (мГн) и *микrogenри* (мкГн):

$$1 \text{ Гн} = 1000 \text{ мГн} = 1000000 \text{ мкГн}.$$

Особенно проявляется самоиндукция в цепях переменного тока (см. стр. 152).

## ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ВАКУУМЕ, ГАЗАХ И ПОЛУПРОВОДНИКАХ

### Термоэлектронная эмиссия

Вакуум не проводит электрического тока — является диэлектриком. Поэтому в вакууме нет носителей зарядов, которые передавали бы электричество. Если все же необходимо пропустить электрический ток через безвоздушное пространство, то это пространство "инъектируют" электронами извне. Это сравнительно просто. Движение электронов в вакууме приобретает все большее значение для техники в последние десятилетия.

Простейшим методом введения электронов в вакуум является метод *термоэлектронной эмиссии*. Находящиеся в проводнике электроны постоянно совершают неорганизованное *тепловое движение*, но остаются "запертыми" в проводнике, так как они притягиваются атомами металла, от которых отделились. Однако при высоких температурах удерживающие силы могут быть преодолены быстрыми электронами. Электроны выбрасываются из нагретого тела. Чтобы преодолеть потенциальный барьер у границы тела, требуется известная затрата энергии — *работа выхода*. Эта работа зависит от материала проводника: имеются материалы, например соединения бария, которые уже при температуре ниже  $1000^{\circ}\text{C}$  освобождают большое количество электронов, и известны материалы, например вольфрам, которые должны быть доведены до белого каления, прежде чем отдадут заметное число электронов.

Вылетевшие электроны обволакивают провод подобно облаку. Образуется *отрицательный пространственный заряд*, который препятствует дальнейшему вылету электронов из проволочного проводника. Искусственными мерами удастся "рассредоточить" эти "облака".

В откачанном стеклянном баллоне помещают вблизи испускающего электроны проводника металлическую пластинку. Ее соединяют с положительным полюсом источника тока, отрицательный полюс которого подключают к эмиссионному

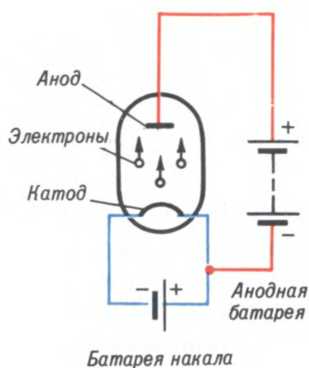


Рис. 66. Электронный ток в вакууме (принцип диода)

проводнику. Электроны пространственного заряда притягиваются положительно заряженной пластинкой — анодом. Пространственный заряд рассредоточивается, и из соединенного с отрицательным зажимом эмиссионного проводника (катода) вылетают непрерывно новые электроны.

На рис. 66 показано постоянное истечение электронов от катода к аноду. Так как движение электронов означает электрический ток, то можно сказать: внутри стеклянного баллона течет *электронный ток*. Электроны, которые достигают анода, через анодный источник тока направляются опять к катоду. Таким образом поддерживается постоянная циркуляция электронов.

Движение электронов внутри *баллона* ускоряется. Электроны падают на анод. Скорость, с которой они достигают анода, зависит только от напряжения между катодом и анодом, но не от расстояния между электродами. Даже при относительно низком напряжении движение электронов к аноду достигает очень большой скорости, например:

$U, \text{В}$ . . . . .	1	10	100	1 000
$v, \text{км/с}$ . . . . .	595	1 885	5 950	18 850

Вследствие больших скоростей электроны обладают значительной энергией. При столкновении с анодом большая часть этой энергии преобразуется в теплоту.

Если переключить зажимы на находящейся в анодной цепи батарее, то внутри баллона ток не потечет, так как электроны уже не будут притягиваться анодом. Но сам анод при этом

электронов не испускает, так как температура анода недостаточно высока. Итак, лампа действует как выпрямитель: пропускает электрический ток только в одном направлении. Если заменить в анодной цепи батарею источником переменного тока, то через пространство между катодом и анодом ток потечет только тогда, когда анод относительно катода будет заряжен положительно. Другая "полуволна" лампой "запирается".

Это явление используют тогда, когда необходимо переменное напряжение и переменный ток преобразовать в постоянное напряжение и постоянный ток (рис. 67). "Выпрямительные" лампы достаточно хорошо известны, так как широко используются в радиоприемниках и телевизорах. Они могут преобразовывать низкие частоты переменного напряжения и тока в очень высокие. С другой стороны, сила тока, которую

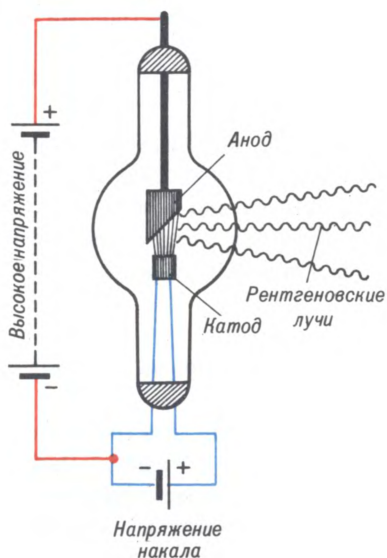
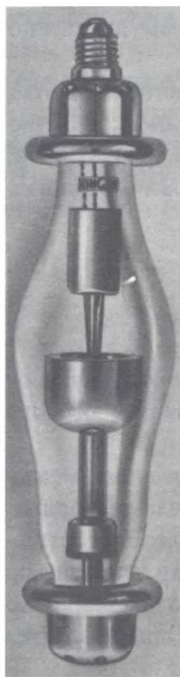


Рис. 68. Рентгеновская трубка

Рис. 67. Выпрямительная лампа для высоких напряжений

могут пропускать такие лампы, относительно ничтожна. Однако в технике связи эти выпрямители, называемые *диоды* (имеют два электрода), хорошо оправдывают себя.

При столкновении с препятствиями не вся кинетическая энергия электронов преобразуется в теплоту. Небольшая часть переходит в очень коротковолновое электромагнитное излучение — в *рентгеновские лучи* (*Вильгельм Конрад Рентген*, 1845—1923).

Нет необходимости особенно подробно останавливаться здесь на разнообразном применении рентгеновских лучей в медицине, науке и технике. Они известны повсеместно. Следует упомянуть только, что рентгеновские трубки (рис. 68) в принципе построены так же, как выпрямительные лампы. Мощный катод излучает плотный поток электронов, который ускоряется при движении к аноду очень высоким напряжением между катодом и анодом. При бомбардировке анода быстрыми электронами часть их энергии превращается в рентгеновское излучение. Анод конструируют так, чтобы рентгеновские лучи были направлены преимущественно в одну сторону.

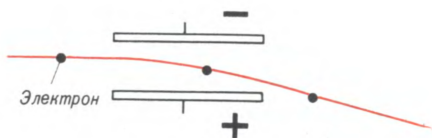
У анода выделяется значительное количество теплоты, которую можно отвести водяным охлаждением. Обычно анод непрерывно вращается с помощью электродвигателя. При этом под электронный поток попадают разные участки анода и перегрев уменьшается.

### **Электроны на заданных траекториях**

В диоде электроны летят по кратчайшему пути от катода к аноду. Однако не представляет особого труда изменить траекторию полета электронов.

Если "выстрелить" электроном в пространство между двумя пластинами (рис. 69), к которым подведено напряжение, то электрон притягивается к одной из пластин и отталкивается от другой во время пролета между пластинами. Он описывает параболу подобно горизонтально или наклонно брошенному камню, летящему с ускорением под действием силы тяжести.

Рис. 69. Отклонение электрона в электрическом поле



Точно так же отклоняется электрон в магнитном поле. Траектория его движения определяется по правилу левой руки. При этом он описывает часть круговой орбиты. Если выстрелить электрон наклонно к силовым линиям, то можно получить винтовую орбиту или петлю.

Уже несколько десятилетий наука использует отклонение траектории полета электронов под действием электрических и магнитных полей для определения скорости и массы электронов.

Это явление широко используется для создания многочисленных приборов и устройств в различных областях науки и техники, которые сегодня являются крайне важными. Одним из первых таких устройств оказалась *"трубка Брауна"* (Карл Фердинанд Браун, 1850–1918), которая в усовершенствованном виде известна нам как приемная электроннолучевая трубка – кинескоп.

Трубка Брауна (рис. 70) была создана для того, чтобы сделать видимыми быстрые электронные процессы. Главная

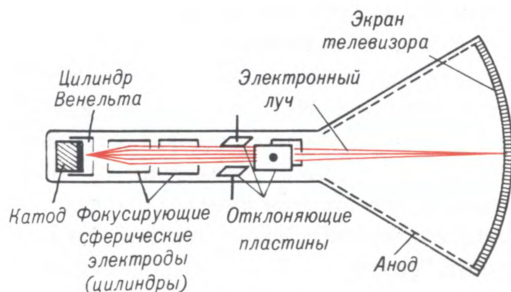


Рис. 70. Брауновская трубка с электростатическим отклонением



идея ее состоит в том, чтобы заменить "громоздкую" стрелку электрического измерительного прибора безынерционным "электронным указателем".

В брауновской трубке этим указателем является узкий электронный пучок — *электронный луч*. Его получают, пропуская выходящие из катода электроны через цилиндр, к которому подведено определенное напряжение или в котором они проходят через магнитное поле специальной формы (см. также стр. 125). Электроны ускоряются анодом, который в большинстве случаев является металлическим покрытием, нанесенным на внутреннюю сторону конически расширяющейся трубки. "Острие" электронного луча падает на плоский или слегка выгнутый *экран телевизора*. Экран покрыт составом (люминофором), который светится при попадании на него быстро летящих электронов. В настоящее время имеется настолько большой выбор таких материалов, что практически можно добиться любого желаемого не только цвета, но и оттенка.

Электронный луч необходимо постоянно то усиливать, то ослаблять. Для этого в трубке помещен *цилиндр Венельта* (*Артур Венельт*, 1871—1944). Он представляет собой маленькую, с отверстиями в дне жестяную чашечку, которая надевается на катод трубки Брауна. Между цилиндром Венельта и катодом напряжение регулируется так, чтобы цилиндр был отрицательно заряжен относительно катода. Вследствие этого он "отталкивает" больше или меньше электронов в зависимости от высоты напряжения, т.е. он регулирует электрический ток. Если выбирают достаточно высокое напряжение, то электронный луч полностью запирается, соответствующее место телевизионного экрана, на которое теперь больше не попадают электроны, становится темным.

Там, где "острие" электронного луча падает на экран, возникает светящееся пятно. Если надо воспроизвести электрический процесс, то его следует "записать" на экране, т.е. суметь "развернуть" на всей поверхности экрана. Это достигается воздействием электрическими или магнитными полями на электроны при их движении от катода к аноду.

Можно, например, предусмотреть внутри трубки *отклоняющие пластины*. Это расположенные друг против друга

металлические пластины, на которые подается напряжение. Обычно ставят две пары таких пластин, располагая их под углом  $90^\circ$  друг к другу.

Сначала подается напряжение на расположенные горизонтально отклоняющие пластины. Если при этом верхняя пластина заряжена положительно, а нижняя — отрицательно, то электрические силы сместят электронный луч вверх. Световое пятно сместится на телеэкране в вертикальном направлении. Если переключить полюсы, то электронный луч сместится вниз. Отклонение луча прямо пропорционально приложенному к пластинам напряжению — *отклоняющему напряжению*. Так как электроны летят к экрану с очень большой скоростью, то каждое изменение напряжения на отклоняющих пластинах почти с такой же скоростью отражается на перемещениях свободного от инерции светового пятна.

Если, например, приложить переменное напряжение к пластинам вертикального отклонения, то пластины попеременно будут становиться положительными и отрицательными, причем напряжение постоянно меняется между крайними значениями, то возрастая, то падая. Световое пятно постоянно перемещается на световом экране в вертикальном направлении снизу вверх и сверху вниз. При очень больших частотах переменного напряжения, благодаря инерционности зрительного восприятия, изображение на экране воспринимается как единое целое. Этот эффект усиливается тем, что материал люминофора обладает свойством послесвечения (люминофор продолжает светиться в течение некоторого времени после прекращения бомбардировки его электронами).

Если приложить напряжение к вертикально стоящей паре пластин, то можно отклонять электронный луч в горизонтальном направлении вправо или влево.

Если приложить напряжение одновременно к обоим парам пластин, то световое пятно будет передвигаться в горизонтальном и вертикальном направлениях. Соответствующим выбором "отклоняющих напряжений" можно привести световое пятно в любую желаемую точку телевизионного экрана.

Комбинируя напряжения в определенной последовательности, можно электронным лучом записывать исследуемые или измеряемые электрические процессы.

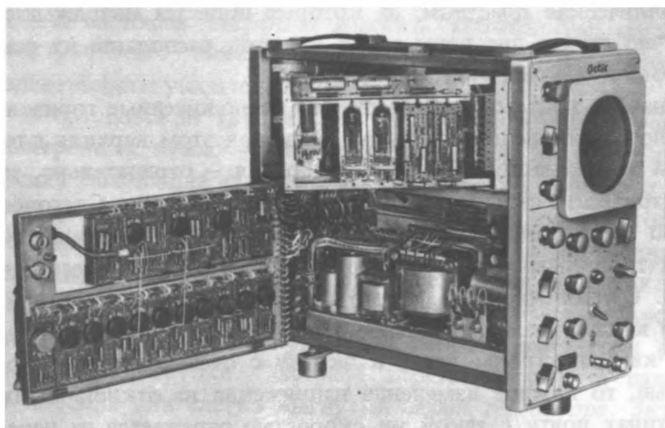


Рис. 71. Внешний вид дефектоскопа с осциллографом

Приборы, в которых используется трубка Брауна, называются *электроннолучевыми осциллографами*. Их применение не ограничивается испытательной и измерительной электротехникой (рис. 71). Этим способом исследуют также акустические и механические колебательные процессы, электрические напряжения сердца или нервной системы живых организмов. Важные элементы телевизоров и радиоприемников построены по принципу трубки Брауна.

Для фокусирования пучка электронов при помощи электрического или магнитного поля конструируют *электронные линзы*. В них электронный пучок ведет себя подобно световому лучу в стеклянных линзах.

Электронные линзы состоят либо из металлических диафрагм с отверстиями посередине, расположенных в определенном порядке относительно друг друга и находящихся под различным напряжением, либо из магнитных катушек, внутри которых проходит электронный луч. Соответственно различают *электростатические* и *электромагнитные* электронные линзы.

Электронные линзы могут собирать и рассеивать пучки электронов, могут увеличивать или уменьшать "изображение" предметов, которые либо сами излучают электроны, либо более или менее хорошо пропускают электронный луч в зависимости от плотности.

Наиболее широкое применение электронные линзы нашли в *электронном микроскопе* (рис. 72), который позволяет получить увеличение до 500 000 раз (в световом микроскопе — 100—1500 раз).

В электронном микроскопе с помощью электрически раскаленного катода получают мощный электронный поток и преобразуют его электромагнитной линзой, *конденсором*, в параллельные пучки. Эти электронные пучки падают на электронно-микроскопический препарат. Электроны частично поглощаются, как свет диапозитивом, частично рассеиваются. Позади препарата находится следующая электронная линза — *объектив*. Увеличенное объективом изображение исследуемого препарата еще раз увеличивается третьей линзой.



Рис. 72. Работа с электронным микроскопом

На телеэкране, фотопластине или в фильме возникает окончательная картина. В электронном микроскопе используются электромагнитные или электростатические линзы.

Так как электронные лучи могут проходить большие расстояния только в вакууме, то электронный микроскоп необходимо внутри все время откачивать. Исследуемый препарат тоже должен находиться в безвоздушном объеме. Это требует не только высокопроизводительного откачивающего оборудования и монтажа особых вакуумных шлюзов, но и применения совсем новой техники приготовления исследуемого препарата.

Электронный микроскоп поэтому является дорогим и сложным устройством. Однако он быстро окупается. Не только медицина и биология, но и материаловедение, и химическая индустрия получают новые бесценные сведения с помощью электронного микроскопа.

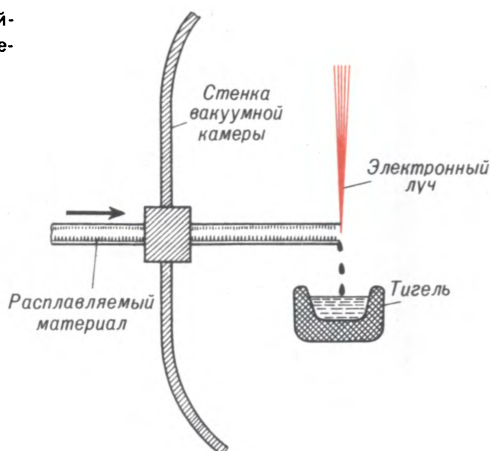
В большинстве случаев является неблагоприятным то, что электроны при бомбардировке нагревают препятствия. Эту теплоту приходится отводить. Однако в последние годы открывается возможность широкого применения этой теплоты при прямой "электронной бомбардировке" материалов.

Для многих технических устройств требуется очень "чистые" материалы. В ходе их обработки осуществляется расплавление, при этом очень трудно избежать загрязнения материала горючими газами или атмосферным воздухом. Поэтому отдельные материалы плавят непосредственно в вакууме.

При этом оказываются наиболее пригодными особые *электроннолучевые печи* (рис. 73). Расплавляемый материал в виде стержня вводится в камеру, из которой откачан воздух насосным агрегатом. На конец стержня направляется мощный электронный луч. Материал нагревается, плавится и стекает в тигель. Загрязнение расплава горючими газами или воздухом исключается. Кроме того, во время расплавления удаляются все находившиеся в материале остатки газов. Они удаляются откачкой.

Электронным лучом могут расплавляться самые тугоплавкие материалы. Эта способность электронного луча позволила

Рис. 73. Принцип действия электроннолучевой печи



открыть новый способ сварки. Тончайшие отверстия, пазы и т. п. луч пробивает в доли секунды, на что ранее затрачивалось много времени.

### Усилители электрических колебаний

Реле способно с помощью слабых токов включать и отключать сильные токи. Однако нельзя с помощью слабых изменяющихся токов непрерывно управлять силой других токов. В технике же часто требуется именно это.

Когда изобрели телефон, то оказалось, например, что на длинных линиях передачи ток настолько ослаблялся, что нельзя было вести устойчивых переговоров. Его необходимо было *усиливать*. Для этого использовали электромагнитное *телефонное реле*, которое усиливало слабые электрические сигналы до значений, достаточных для работы телефонных аппаратов.

Попытки сконструировать механическое телефонное реле были тщетны. Только *электронные лампы, приемно-усилительные лампы*, принесли решение проблемы.

Принцип действия электронных ламп рассмотрен выше. В электроннолучевой трубке электронный поток регулируют с помощью цилиндра Венельта. В электронной лампе в качестве

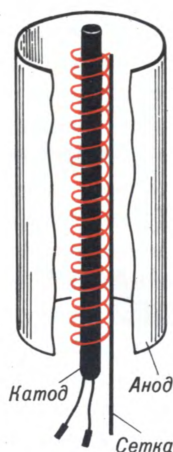


Рис. 74. Триод

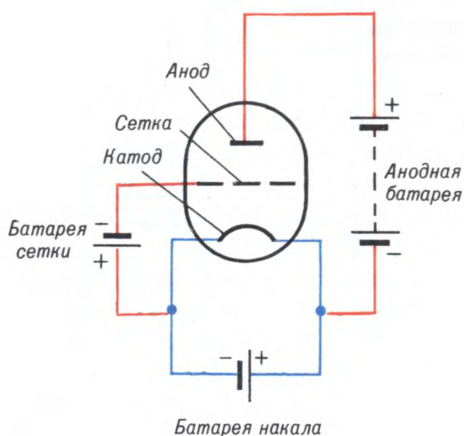


Рис. 75. Триод и источники питания

цилиндра Венельта выступает *управляющая сетка*. Это, например, проволочный виток, который располагается между катодом и цилиндрическим анодом. Такие лампы, которые содержат три электрода, называют *триодами* (рис. 74).

Если между анодом и катодом триода включить источник тока (рис. 75), то в цепи по-прежнему потечет *анодный ток*, как и у диода. Конечно, теперь электроны должны протекать между витками сетки. Между сеткой и катодом включается дополнительный источник тока — *батарея сетки*. Этот источник тока влияет на анодный ток в зависимости от значения напряжения и полярности.

Если включить в цепь батарею сетки отрицательным полюсом к сетке, а положительным — к катоду, то анодный ток уменьшится; наконец сетка вообще перестанет пропускать электроны; анодный ток прервется. Наоборот, анодный ток значительно увеличится при включении этой батареи положительным полюсом к сетке, отрицательным — к катоду. Этот случай, однако, нежелателен в обычных схемах усиления.

Следовательно, можно управлять анодным током с помощью потенциала управляющей сетки. Это управляющее действие не ограничивается включением и отключением, как у реле, а может производиться непрерывно. Кроме того,

этот процесс является почти безынерционным благодаря высоким скоростям электронов.

Так как сетка расположена вблизи катода, т.е. в области, где электроны еще не приобрели слишком большой скорости, то даже небольшие изменения потенциала управляющей сетки вызывают значительные изменения силы анодного тока. Это явление и лежит в основе действия усилителей, собранных на электронных лампах.

Если подключить зажимы *A* и *B* (рис. 76) к слаботочной электрической цепи длинной линии телефонной связи, то ток потечет через резистор *R1*. По закону Ома на этом резисторе возникает *падение напряжения*, которое одновременно выступает как *управляющее напряжение* между сеткой и катодом триода. Это напряжение изменяется так, что сетка никогда не может приобрести положительный потенциал относительно катода. Соответственно включается батарея сетки.

Управляющее напряжение, которое является параметром электрической цепи телефонной связи и тем самым первичных звуковых колебаний, определяет анодный ток. Этот ток замыкается через резистор *R2*. Здесь также происходит падение напряжения. Оно меняется в ритме изменений анодного тока, т.е. дает ту же картину изменения звуковых колебаний.

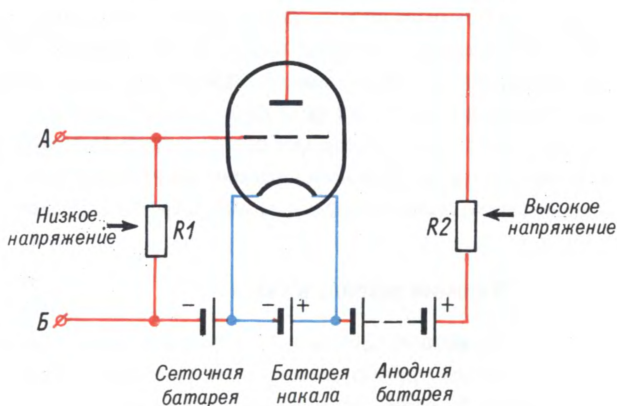


Рис. 76. Триод в качестве усилителя



Анодный ток, однако, намного сильнее слабого тока линии телефонной связи, который протекает через резистор  $R1$ . Кроме того, сила анодного тока не зависит от свойств линии связи, а только от конструкции лампы и от мощности источника тока в анодной цепи. Поэтому анодный ток дает на резисторе  $R2$  значительное падение напряжения. Оно характеризует степень усиления низкого напряжения на сетке.

Этим способом можно получить более чем стократное усиление напряжения. Если недостаточно одной лампы, то можно полученное на  $R2$  усиленное напряжение подавать на вторую лампу и т.д. При этом общее усиление получается из произведения усилений на отдельных ступенях.

Электронные лампы усиливают переменное напряжение с частотами до многих миллионов герц. Поэтому лампы имеют большое значение для радиотехники, радиовещания и телевидения. Нельзя представить себе без приемно-усилительных ламп промышленную электронику, технику усиления электрических сигналов, радиолокацию и радионавигацию. Полупроводниковая техника предоставила еще более эффективные конструктивные элементы, которые во многих областях заменили электронные лампы.

Со временем появилось много различных типов электронных ламп. Так, самые большие сегодня лампы имеют катод *косвенного накала*. Ток накала раскаляет тонкий провод, который разогревает тонкую трубочку. Поверхность этой трубочки покрыта слоем, излучающим электроны. Так можно получать катоды с весьма мощным излучением электронов; накаливание трубки может производиться почти всегда имеющимся в распоряжении переменным током.

Оказалось также целесообразным строить лампы не только с одной, но и со многими сетками. Наиболее часто употребляемым типом ламп остаются лампы с тремя сетками — *пентоды*.

### Явления разряда в газах

Ламповые диоды и триоды являются электровакуумными приборами. Электрические свойства ламп не меняются, если заполнить их газом при низком давлении. Пока приложенное напряжение между катодом и анодом

остаётся низким, ток будет незначительным. Но если напряжение постепенно повышают, то при определенном его значении сила тока "подскакивает вверх". Одновременно внутри лампы появляется свечение. Цвет этого свечения зависит от вида наполняющего газа: гелий — желто-розовый, аргон — фиолетовый, неон — красный. Если заполнить баллон лампы парами натрия, появляется свечение интенсивного желтого цвета.

Как и в вакууме, электроны здесь ускоряются от катода к аноду. При этом они многократно сталкиваются с атомами наполняющего газа, которые находятся в неупорядоченном тепловом движении внутри лампы. Если электрон между двумя соударениями приобретет достаточную энергию движения, что происходит при определенном "напряжении зажигания", то может при последующих соударениях выбить электроны из встречного атома. Этот электрон устремляется в направлении анода и "освобождает" по пути следующие электроны. В результате этой ударной ионизации ток растет лавинообразно. Он может разрушить лампу, если не предусмотреть специальных мер по ограничению тока. Одновременно большое число атомов "возбуждается". Они приобретают энергию, но не ионизируются, а отдают ее вспышками света. Этот процесс возникает одновременно во многих местах баллона лампы и вызывает свечение наполняющего газа.

Это явление используют в газоразрядных ионных вентилях с неуправляемым электрическим разрядом — *газотронах*. Так как направление движения электронов и ионов определяется притяжением катода и анода, газоразрядные лампы можно использовать также для выпрямления переменного тока. Они могут выпрямлять ток намного большей силы, чем электровакуумные лампы. Очень большие токи также могут выпрямлять *ртутные вентили*, использующие процесс ионизации.

Если в газотроне установить один или несколько управляющих электродов между катодом и анодом, то можно получить газоразрядный прибор — *тиратрон*. В качестве приемно-усилительной лампы он не годится. Но в нем мы можем изменять напряжение зажигания, регулируя напряжение на управляющей сетке, т.е. добиваться, чтобы лампа загоралась при более высоком или более низком напряжении между

катодом и анодом. После зажигания сетка теряет свои управляющие свойства, так как ее окружают положительно заряженные ионы. Несмотря на это, тиратроны являются важными элементами промышленной электроники\*.

Во многих отраслях промышленности необходимо регулировать мощность двигателей или других электрических устройств без скачков и, по возможности, без потерь, причем часто еще и дистанционно, на большом расстоянии. Здесь помогает тиратрон.

Рассмотрим тиратрон, анод и катод которого соединены с источником переменного тока через нагрузку. Между сеткой и катодом тиратрона приложено такое напряжение, при котором тиратрон зажигается; при этом ток течет через лампу и нагрузку. Тиратрон может зажигаться только при полуволне (см. стр. 120), при которой анод положителен, а катод отрицателен. В конце полуволны при *напряжении гашения* ток прерывается, чтобы опять возникнуть при следующей полуволне. Следовательно, тиратрон действует как выпрямитель. В его анодной цепи течет постоянный ток в виде импульсов тока и промежуточных пауз. Таким током, например, можно питать двигатель постоянного тока.

Изменением напряжения управляющей сетки можно менять напряжение зажигания. Если напряжение сетки будет отрицательным, то тиратрон будет зажигаться при относительно высоком напряжении. Если "сдвинуть" напряжение сетки в положительном направлении, то зажигание лампы произойдет раньше. Эти изменения сеточного напряжения могут осуществляться с больших расстояний, так как стоимость проводки незначительна из-за передачи на сетку очень малого напряжения.

Сдвигом точки зажигания в большей или меньшей степени сокращают импульсы тока. Паузы между импульсами становятся длиннее, сами импульсы — короче. Сила тока в анодной цепи тиратрона уменьшается или возрастает в зависимости от значения напряжения сетки. У двигателя, питающегося таким током, может регулироваться, например, частота вращения.

---

\* В настоящее время тиратроны повсеместно вытесняются тиристорами. (Прим. перев.)

Кроме тиратрона были разработаны и другие типы газоразрядных ламп.

Свечение наполнителя в газоразрядном приборе является побочным явлением. Однако это свечение привлекало к себе внимание в течение многих десятилетий, так как не было связано с сильным тепловыделением, неизбежным у других источников света.

Первыми светильниками такого типа стали появившиеся в середине прошлого века *"трубки Гейслера"* (Генрих Гейслер, 1814—1879). Если подвести напряжение в несколько тысяч вольт к продолговатой стеклянной трубке, которая оснащена двумя металлическими пластинками в качестве электродов и заполнена сильно разреженным газом, то трубка или особо изготовленный катод начинает светиться, не нагреваясь. В трубке всегда имеется некоторое количество носителей зарядов, находящихся в движении и обладающих вследствие высокого напряжения такой энергией, которая может вызывать *поток заряженных частиц*.

Опыты по использованию гейслеровских трубок для общего освещения оказались неудачными. Их яркость оказалась недостаточной, цвет для глаза — необычным. Высокое напряжение этих трубок требовало особых мер по изоляции. Однако в световой рекламе трубки Гейслера широко применяются, особенно благодаря тому, что им можно придавать почти любую желаемую форму.

Вслед за гейслеровскими трубками появились *люминесцентные лампы*. В отличие от рекламных осветительных трубок они работают при обычном напряжении сети и пригодны для освещения.

Люминесцентная лампа (рис. 77) представляет собой довольно длинную стеклянную трубку, заполненную разреженными парами ртути. Эти пары при газовом разряде порождают не только голубовато-зеленый свет, но прежде всего невидимое ультрафиолетовое излучение. Это излучение и используется в люминесцентной лампе. Внутренняя сторона стеклянного баллона покрывается веществом (люминофором), обладающим свойством ярко светиться под воздействием ультрафиолетовых лучей. Цветовой тон зависит не от характера ультрафиолетового облучения, а от химического

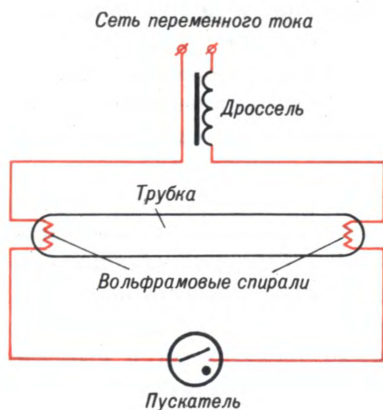


Рис. 77. Люминесцентная лампа

состава люминофора. Этот состав может быть весьма разнообразным.

В лампе на обоих концах помещаются вольфрамовые спиральные электроды. При включении лампы они раскаляются и высвобождают большое количество электронов. Эти электроны облегчают "зажигание" лампы. После зажигания разряд поддерживается в лампе сам собой. Поэтому ток через спирали после нескольких секунд автоматически отключается так называемым пускателем.

Перед люминесцентной лампой включается пуско-регулирующее устройство — *дроссель* (см. стр. 153), состоящий из ферромагнитного сердечника и большого числа витков провода. В дросселе возникает магнитное поле. Если прервать ток через вольфрамовые спирали с помощью пускателя, то магнитное поле мгновенно исчезает. При этом из-за самоиндукции возникает мощный импульс (удар) напряжения, который надежно зажигает лампу. В дальнейшей работе дроссель обеспечивает ограничение силы тока, протекающего через лампу.

Люминесцентные лампы дороже обычных ламп накаливания. Однако их экономичность и срок службы выше, так что первоначальная стоимость быстро окупается. Свечение газового разряда используется также в *лампах тлеющего разряда*. Расход ими энергии и яркость свечения незначительны. Поэтому они наиболее пригодны в качестве сигнальных

и контрольных ламп. В этих лампах тоже необходимо ограничение силы тока. Это обеспечивается с помощью специального резистора, вмонтированного непосредственно в цоколь лампы.

### Полупроводниковые элементы

Систематические исследования процессов электропроводности в полупроводниках, к которым относятся такие материалы, как германий и кремний, селен, сульфиды свинца и кадмия, арсениды галлия и индия, фосфид галлия и многие другие, начались, когда механизм электропроводности в металлах, жидкостях и газах был давно выяснен. Разберем механизм электропроводности на примере особенно важного для полупроводниковой техники материала — германия.

Германий — химический элемент IV группы. В идеальном случае все его четыре валентных электрона были бы связаны с валентными электронами соседнего атома. Это были бы не электроны проводимости, и германий был бы диэлектриком. Но уже при комнатной температуре отдельные электроны могут покидать "свои" атомы и передвигаться в кристалле как электроны проводимости. Их число увеличивается с ростом температуры, проводимость — возрастает. (В противоположность этому в металлическом проводнике уже при комнатной температуре каждый атом "отдает" электрон; число электронов проводимости, следовательно, очень велико.)

Там, где электрон покинул атом, возникает "дырка". Она характеризуется недостатком отрицательного заряда и может поэтому рассматриваться как положительно заряженная частица. Если вблизи дырки освободился электрон, может показаться, что дырка "закрывается". Однако при этом возникает новая дырка на месте, которое оставил заполнивший предыдущую дырку электрон. Эта дырка опять может быть закрыта электроном, который, в свою очередь, оставил после себя дырку, и т.д. Следовательно, в кристалле движутся не только электроны, но и дырки.

Если приложить электрическое напряжение к противоположным сторонам кристалла германия, то электроны проводимости приблизятся к положительному полюсу; дырки сместятся к отрицательному полюсу. Кроме электронного тока, в противоположном ему направлении потечет *дырочный ток*.

В описанном процессе участвуют только атомы германия и их электроны. Поэтому говорят о *собственной проводимости* германия. Она сравнительно мала при комнатной температуре, с повышением температуры становится заметной, а затем резко возрастает.

Важной для германия и для других полупроводниковых материалов является так называемая *примесная проводимость*. Она проявляется, когда в кристалл полупроводника "вводят" чужеродные атомы в качестве примесных центров. Даже крохотного количества такого "загрязнения" (1 атом на  $10^6$  атомов основного материала) достаточно, чтобы резко изменить электрические свойства полупроводника.

Предположим, что в кристаллическую решетку германия введены пентавалентные атомы, например, мышьяка. Из пяти валентных электронов атома мышьяка только четыре будут связаны соседним атомом германия, пятый может передвигаться в германии как электрон проводимости. То же происходит и со всеми другими атомами мышьяка. Здесь имеем дело с избыточным полупроводником (так как проводимость осуществляется за счет избытка отрицательных электронов) — с *n*-проводящим германием, с германием *n*-типа.

Если ввести в кристаллическую решетку четырехвалентного германия трехвалентные атомы (например, атомы бора, индия или алюминия), то у примесного центра для полной связи недостает валентного электрона — возникает дырка. Очень скоро она заполняется электроном от соседнего атома германия, где, в свою очередь, образуется новая дырка. Под влиянием приложенного извне напряжения дырки перемещаются. Возникает дырочный ток, дырочная проводимость.

Эта проводимость возникла благодаря недостающим электронам. Поэтому говорят о полупроводнике с дефицитом (так как в этом случае в процессе проводимости превалируют положительные дырки) — о *p*-проводящем германии, или

о германии  $p$ -типа. Оба вида примесной проводимости имеют важное значение в полупроводниковой технике.

Использование большинства полупроводниковых элементов основано на процессах, протекающих на границе соприкосновения двух областей различных типов проводимости. Так, например,  $p$ — $n$ -переход осуществляется в пограничной области соприкасающихся  $p$ - и  $n$ -проводящих полупроводниковых материалов, составляя основу *полупроводниковых диодов*. Их действие можно рассмотреть на кристалле германия, в котором происходит такой переход и имеется как  $n$ -область, обогащенная "избыточными" электронами, так и  $p$ -область, обедненная электронами, — дырочная область.

Атомы кристалла постоянно совершают тепловые колебания. Электроны проводимости и дырки, следовательно, тоже не покоятся. Вследствие этого на границе  $p$ - и  $n$ -областей непрерывно происходят переходы: из  $p$ -области дырки проникают в  $n$ -область, в то время как электроны из  $n$ -проводящей части переходят в  $p$ -область.

Вблизи границы  $p$ -области положительный заряд исчезает из-за ухода дырок. Это означает, что у границы  $p$ -проводящей части возникает отрицательный пространственный заряд. Этот заряд усиливается еще тем, что из  $n$ -области в  $p$ -область переходят электроны.

В  $n$ -области наблюдается такое же явление, но с обратным знаком. Благодаря переходу электронов и внедрению дырок создается пространственный положительный заряд. Как положительный, так и отрицательный пространственные заряды отталкивают новые носители заряда того же знака. Устанавливается равновесие, при котором новые носители зарядов больше не могут поступать в область пространственных зарядов. В пограничном слое образуется тонкая, обедненная носителями зарядов и вследствие этого слабо проводящая область.

Если подать напряжение на граничную плоскость кристалла, соединив положительный полюс источника тока с  $n$ -областью, электроны будут "отсасываться" с границы  $n$ -проводящей области: они будут двигаться в направлении положительного полюса. Положительный пространственный заряд вблизи границы раздела становится еще резче. На другой стороне,



в  $p$ -области, дырки перемещаются к отрицательному электроду. Вследствие этого вблизи границы отрицательный пространственный заряд возрастает. Граничная область из-за этих процессов настолько обедняется носителями зарядов, что никакой ток протекать уже не может. Создается запирающий слой.

Присоединим теперь положительный полюс источника к  $p$ -области, а отрицательный — к  $n$ -проводящей стороне. Так как одноименные заряды отталкиваются друг от друга, положительный электрод "выдавливает" дырки в граничную область, а отрицательный — электроны. Пространственные заряды вследствие этого ослабляются. Кроме того, в граничной области уменьшается количество носителей заряда. Электропроводность кристалла резко повышается.

Следовательно,  $p$ - $n$ -кристалл относительно беспрепятственно проводит электрический ток в одном направлении, в то время как в противоположном направлении ток почти заперт. Сопротивления в том и в другом случае различаются во много тысяч раз. Этот эффект односторонней проводимости дает возможность использовать  $p$ - $n$ -переход для выпрямления тока. Если приложить обычный переменный ток к  $p$ - $n$ -кристаллу, то ток потечет только во время полуволны, при которой с  $p$ -областью будет соединен положительный полюс источника. При этом через полупроводниковый элемент потечет и слабый обратный ток в противоположном направлении. Он возникает вследствие постоянно имеющейся собственной проводимости полупроводникового материала, зависящей от температуры. Если полупроводниковый элемент сильно нагреть во время работы, то эффект односторонней проводимости  $p$ - $n$ -перехода пропадет из-за возросшей собственной проводимости полупроводника.

Если область  $p$ - $n$ -перехода находится внутри полупроводникового выпрямителя, то он относится к плоскостным выпрямителям — *плоскостным диодам*. Однако область  $p$ - $n$ -перехода может находиться также у наружной поверхности кристалла и располагаться на самом кончике металлической иглы. Тогда получают точечный выпрямитель — *точечный диод*. Эти диоды имеют важное значение прежде всего для преобразования частоты, в измерительной радиоаппаратуре и т.д.

В электронике широко используются в качестве плоскостных выпрямителей меднозакисные и селеновые выпрямители; однако в настоящее время (прежде всего в области больших электрических мощностей) преимущественно распространены кремниевые и германиевые выпрямители.

Для этого имеются важные технические и экономические основания. Запирающее напряжение отсечки у кремниевого выпрямителя во много раз выше, чем, например, у селенового. Поэтому при выпрямлении высокого напряжения обходятся несколькими выпрямляющими элементами, тогда как ранее приходилось последовательно включать очень большое количество элементов. Так же и для силы тока: один кремниевый выпрямитель может преобразовывать более чем тысячекратную силу тока по сравнению с селеновым выпрямителем (при одинаковой площади  $p$ - $n$ -перехода). Вследствие этого кремниевый (или германиевый) выпрямитель занимает намного меньший объем, чем его предшественники. К.п.д. кремниевого выпрямителя составляет примерно 95% и так далеко превосходит другие выпрямители, что использование устройств на кремниевых элементах всегда обеспечивает значительную экономию энергии (особенно у крупных потребителей постоянного тока, например в химической промышленности).

Достоинство полупроводниковых диодов очевидно: это еще один шаг на пути от выпрямительных ламп к транзисторам, к развитию силовой полупроводниковой техники. *Транзистор* является важнейшим элементом современной электроники.

В кристалле германия или кремния друг за другом расположены три области различного вида проводимости: *эмиттер*, *база* (в несколько микронметровой толщины) и *коллектор*. Каждая область соединена со своим электродом. В зависимости от того, как расположены относительно друг друга области различной проводимости, говорят о транзисторах  $p$ - $n$ - $p$ - или  $n$ - $p$ - $n$ -типа.

Транзистор  $p$ - $n$ - $p$ -типа (рис. 78) соединен с двумя источниками тока в несколько вольт и с двумя резисторами. Рассмотрим сначала только левый  $p$ - $n$ -переход, условно считая его полупроводниковым диодом. Этот переход подключен

Эмиттер (р) База (п) Коллектор (р)

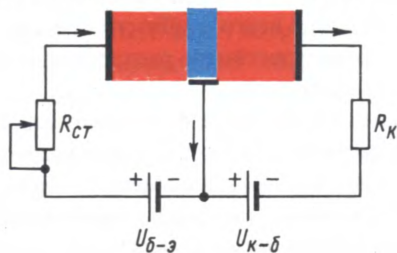


Рис. 78.  $p-n-p$ -транзистор и схема его включения

в направлении пропускания электрического тока: из левой  $p$ -области дырки проталкиваются в граничную область и в базу (эта область называется "эмиттером" — выпускающей). Правый  $p-n$ -переход, наоборот, заперт (область называется "коллектором" — собирающей). Через него протекает только слабый обратный ток. Решающим для работы транзистора является то, что обе изображенные на схеме цепи соединяются друг с другом базой.

Большая часть проникающих в базу дырок обычно течет не к электроду базы, чтобы соединиться с электронами проводимости, а идет к правой границе базы и далее в правую  $p$ -область. Они притягиваются к электроду коллектора. Следовательно, ток в цепи коллектора определяется не протекающим через запирающий резистор  $R_K$  током на переходе база—коллектор, а прежде всего приходящими из базы дырками.

Сопротивление прямому току на переходе эмиттер—база ничтожно. Поэтому достаточно уже небольшого изменения напряжения, вызванного, например, регулировкой резистора  $R_{СТ}$ , чтобы можно было существенно изменить эмиттерный ток. Эти изменения отражаются, естественно, на числе пересекающих базу дырок, т.е. коллекторный ток изменяется пропорционально изменениям эмиттерного напряжения.

Так как сопротивление перехода база—коллектор в запертом направлении велико, а в цепь коллектора, кроме того, введен резистор  $R_K$ , то изменения дырочного тока вызывают значительные колебания напряжения в коллекторной цепи резистора  $R_K$ . Но если малые колебания напряжения в эмиттерной цепи (к которым относится и напряжение переменного

тока) увеличиваются в коллекторной цепи, то это значит, что транзистор усиливает. При этом в принципе безразлично, в какой последовательности расположены области проводимости в транзисторе:  $p-n-p$  или  $n-p-n$ . В транзисторе  $n-p-n$ -типа происходят подобные же физические процессы, но в нем электроны и дырки меняются ролями, а полярности приложенных напряжений должны быть изменены на обратные.

В последние годы удалось найти для большинства ламповых схем "транзисторные аналоги". Более того, транзисторы открыли новые возможности для электронных приборов и их каскадов. Так, получили, например, переключающие устройства комбинацией транзисторов  $p-n-p$  и  $n-p-n$ -типа, не применяя ламп. Также установили, что транзистор годится не только для усиления, но может хорошо использоваться в качестве электронного ключа.

Электропитание транзистора проще и экономичнее, чем питание лампы, потребляет он значительно меньшую электрическую мощность. Транзистор не разогревается, может работать при низких напряжениях. Транзистор не настолько чувствителен к тряске, как электронные лампы с вакуумными баллонами и многочисленными деталями, взаиморасположение которых не должно нарушаться.

С изобретением транзистора наступил период миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры. Уменьшение размеров электронных ламп ограничено несколькими кубическими сантиметрами, в то время как площадь кристалла самых мощных транзисторов не превышает нескольких квадратных миллиметров.

Все эти благоприятные свойства имели решающее значение в развитии современной полупроводниковой электроники. Устройства для сбора и обработки информации, электронное оборудование для генерации сигналов, регулирования и контроля содержат многие тысячи элементов. Такие устройства рациональны только тогда, когда элементы экономичны, функционируют надежно, имеют большой срок службы и занимают малый объем. Без полупроводниковой техники подобные устройства были бы, как правило, вовсе невыполнимы. Не появилась бы и современная микроэлектроника, которая позволяет создавать на одном кристалле

полупроводника площадью 30–35 мм<sup>2</sup> электронные устройства, насчитывающие до нескольких десятков тысяч транзисторов.

Первые электронные лампы появились в виде отдельных экземпляров в лаборатории. Прежде чем удалось в больших количествах выпускать надежные лампы, пришлось преодолеть многочисленные трудности. С транзисторами было так же. Первой разновидностью транзисторов были, конечно, не *плоскостные* транзисторы (см. рис. 78), а *точечные*, в которых использовались точечные контакты двух металлических игл (коллектора и эмиттера) с кристаллом полупроводника (в точечном диоде одна металлическая игла).

При производстве плоскостных транзисторов возникли многочисленные трудности, начиная от получения максимально чистых исходных материалов до прикрепления соединительных контактов или защиты готовых транзисторов от влажности, пыли и других загрязнений из воздуха.

Усовершенствование шло прежде всего по трем главным направлениям. Необходимо было изготовлять большие серии надежных транзисторов, точно передающих информацию. Следовало повысить передаваемую транзистором электрическую мощность, которая вначале составляла милливатты; отодвинуть границу частот, при которых транзистор оставался бы работоспособным, к еще более высоким частотам. В соответствии с технологией получения в кристалле зон с различными типами проводимости транзисторы делятся на сплавные, диффузионные, сплавно-диффузионные, мезатранзисторы и др. Здесь остановимся только на сравнительно новом, имеющем большое значение для полупроводниковой электроники *планарном транзисторе* (рис. 79).

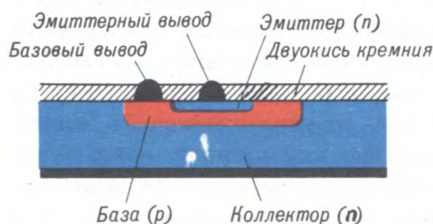


Рис. 79. Структура планарного транзистора

При его изготовлении исходят из  $n$ -проводимости кремниевой пластинки, на верхнюю плоскость которой прежде всего наносят слой двуокиси кремния. Он обладает большой устойчивостью и защищает транзистор от внешних химических и физических воздействий, которые приводят обычно другие транзисторы к сбоям в работе или выходу из строя. В защитном слое вытравливают участок и обрабатывают пластинку парами бора. Атомы бора диффундируют в кремний и образуют базовую область с  $p$ -проводимостью, в то время как основная масса материала пластины образует коллектор (проводимость  $n$ -типа). Во время диффузии на верхней плоскости возникает новый слой двуокиси кремния. Он закрывает окно и защищает базу.

Эмиттерную область (с проводимостью  $n$ -типа) получают диффузией атомов фосфора в заданные участки базовой области. Эмиттер также закрывается двуокисью кремния. Наконец, над эмиттерной и базовой областями вытравливают отверстия для выводов к этим областям. Все эти сложные процедуры выполняются одновременно для многих тысяч планарных транзисторов, которые размещены на одной кремниевой пластине размером в несколько сантиметров. Затем пластину разрезают на отдельные кристаллы, каждый из которых имеет транзисторную структуру.

Планарный транзистор работает в области высоких частот и отличается стабильными параметрами и большим сроком службы. Дальнейшее развитие (эпитаксиальный полупроводник) обеспечило значительное улучшение электрических свойств полупроводников.

Весьма многообещающим транзисторным элементом, который работает по несколько измененному принципу, является полевой транзистор и прежде всего МОС-транзистор\* [металл—окисел—силиций (кремний)]. Управляющий ток поступает на электрод в полупроводниковом материале, протекает в нем по "каналу", который обладает другим типом проводимости, чем основной материал, и выдается

---

\*Этот тип полевых транзисторов в отечественной литературе называется МОП-транзистор (металл—окись—полупроводник). (Прим. перев.)

со второго электрода полупроводника. Канал находится в активной области управляющего электрода. Он "выталкивает", в соответствии с приложенным к нему напряжением, из канала носители зарядов, изменяя, следовательно, в известной мере диаметр канала. Таким образом осуществляется управление.

Исключительное, день ото дня растущее значение полупроводниковой техники связано не только с выпрямительными диодами и усилительными транзисторами, а и с многочисленными новыми направлениями исследований, которые вызывают интерес к работе с полупроводниками и результаты которых очень быстро находят техническое применение.

Диод, например, в необычном исполнении выступает как *емкостный диод*, или варикап. Он тогда ведет себя как конденсатор, емкость которого регулируется приложенным постоянным напряжением. Это необходимо не только для многочисленных управляющих и регулирующих приборов, но и для настройки радио- и телевизионных приемников. Другой вид полупроводникового диода — стабилитрон (*Z-диод*) — нашел широкое применение в защитных и стабилизирующих устройствах. Так называемый *туннельный диод* применяется для усиления и генерирования ВЧ-колебаний простыми средствами. *Фотодиод*, в котором изменение освещенности вызывает возрастание электрического тока, является только одним из многих фотоэлектрических элементов, которые используют процесс электропроводности в полупроводниках. К таким элементам относятся *фоторезисторы*, которые находят применение во многих электронных устройствах промышленности (например, в световых коммутаторах и сумеречных выключателях), *фотоэлементы*, которые находят широкое применение в простейших приборах для измерений освещенности (например, повсеместно известен фотоэлектрический экспонометр). Важное применение нашли фотодиоды в солнечных батареях — полупроводниковых фотоэлектрических генераторах, преобразующих энергию солнечной радиации в электрическую для обеспечения энергией искусственных спутников, межпланетных космических станций. *Фототранзистор*, наконец, является элементом,

который при изменении освещенности не только выдает ток, но еще и усиливает его.

Непосредственное преобразование тепловой энергии в электрическую сначала требовалось в небольших количествах, например для питания радиоприемников или метеостанций. Но советские ученые и инженеры первыми доказали, что можно получать большие электрические мощности, используя термоэлементы в ядерном реакторе. Это результат, который представляет особенный интерес, так как обычный в наше время путь преобразования тепловой энергии в электрическую длителен и связан с большими потерями.

Наоборот, теплота от охлаждаемого объекта может отводиться, если пропускать ток через комбинацию определенных полупроводников. *Полупроводниковые охлаждающие элементы* существуют уже много лет. Они, быть может, когда-нибудь сделают ненужными широко распространенные сейчас типы холодильников.

Для управления сильными токами ранее применялся газоразрядный прибор — тиратрон. Созданный в последние годы полупроводниковый прибор — *тиристор* — не только заменил тиратрон, но и превзошел его в ряде важных свойств.

Тиристор является кремниевым полупроводником с целым рядом чередующихся слоев  $p-n-p-n$ . Управляющий ток протекает через внешние  $n$ - и  $p$ -слои. Затем тиристор запирает ток, и даже в обоих направлениях (в отличие от диода). Однако если к внутреннему  $p$ -слою приложить положительное напряжение или импульс в несколько вольт, то тиристор начнет пропускать ток в одном направлении, как диод. Он работает как выпрямитель, причем сила выпрямленного тока изменяется с помощью внутреннего  $p$ -слоя (управляющего электрода). Современные тиристоры могут управлять токами свыше 1000 А.



## ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

### Получение и характеристики

Уже не раз упоминалось о переменном токе и о его значении для электротехники. Теперь необходимо ближе познакомиться с его свойствами и законами поведения.

В проволоочной рамке наводится э.д.с., когда рамка движется в магнитном поле так, что при этом изменяется число силовых линий, пересекаемых ею. Это имеет место также в случае, когда рамка вращается в магнитном поле.

В устройстве, показанном на рис. 80, рамка равномерно вращается в однородном магнитном поле. Ее концы подключены к *контактным кольцам*. По ним скользят металлические *щетки*, которые соединяются с потребителем тока.

При вращении рамки в ней возбуждается э.д.с., которая вызывает в цепи потребителя ток. Его направление определяется с помощью правила правой руки. В изображенном на рисунке положении рамки в верхнем отрезке проводника, который движется вправо, ток течет от нас, в нижнем отрезке, который движется влево, — к нам.

Индуктируемые э.д.с. в обоих отрезках проводника направлены так, что они складываются.

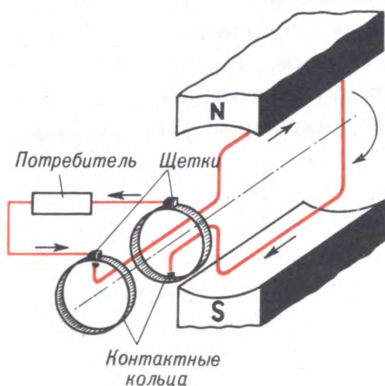


Рис. 80. Устройство простейшего генератора переменного тока

Индуктированная в рамке э.д.с. зависит от того, как быстро меняется число пересекаемых рамкой силовых линий магнитного поля. Это число не меняется, когда рамка проходит положение, при котором она перпендикулярна к силовым линиям, поэтому в это мгновение э.д.с. не индуцируется. Скорость изменения числа силовых линий становится наибольшей, когда рамка проходит положение, при котором она параллельна этим линиям. В это мгновение индуцируется наибольшая э.д.с.

Когда рамка приходит в положение, при котором она параллельна силовым линиям магнитного поля, один отрезок витка переходит из левой области в правую, другой — наоборот. Это означает, что каждый раз при прохождении "нейтральной зоны" э.д.с. меняет знак.

Если исследовать изменение э.д.с. в зависимости от угла поворота рамки, то можно получить синусоиду (рис. 81), известную из математики и многих примеров колебательного движения.

Поворот рамки на  $360^\circ$  образует полную волну э.д.с. (или тока). Первая "полуволна" соответствует повороту рамки на  $180^\circ$  от нейтральной зоны к нейтральной зоне. Э.д.с. возрастает от нуля до максимума и вновь падает до нуля. В течение второй полуволны (она образована дальнейшим поворотом на  $180^\circ$ ) ход э.д.с. повторяется, правда, при обратном направлении э.д.с. (или тока).

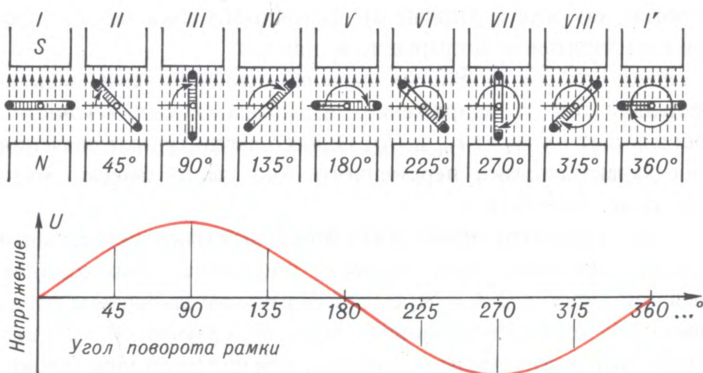


Рис. 81. Кривая переменного напряжения

Последовательность таких волн называется переменным током, а отдельная волна — *периодом*. Число периодов, которое осуществляется в единицу времени, т.е. в одну секунду, является *частотой* ( $f$ ) переменного тока. Если обозначить время одного периода  $T$ , то

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{или} \quad f = \frac{1}{T}.$$

Единицей частоты является *герц*, названный по имени немецкого физика *Генриха Герца* (1857–1894). Обычно используют кратные единицы:

$$\begin{aligned} 1 \text{ килогерц (кГц)} &= 1000 \text{ Гц} = 10^3 \text{ Гц}; \\ 1 \text{ мегагерц (МГц)} &= 1\,000\,000 \text{ Гц} = 10^6 \text{ Гц}; \\ 1 \text{ гигагерц (ГГц)} &= 1\,000\,000\,000 \text{ Гц} = 10^9 \text{ Гц}. \end{aligned}$$

Частота выражается в секундах в минус первой степени ( $\text{с}^{-1}$ ):

$$1 \text{ Гц} = \frac{1}{\text{с}} = \text{с}^{-1}.$$

Частота переменного тока в электрических цепях большинства стран составляет 50 или 60 Гц. Это означает, что направление тока (и напряжения) в каждую секунду меняется 100 и 120 раз.

Сила тока и напряжение переменного тока измеряются соответственно в амперах и вольтах. При этом сразу возникает вопрос, что следует понимать под силой тока или напряжением, так как в отличие от постоянного тока здесь и сила тока и напряжение непрерывно меняются.

Ясно, что из мгновенных значений особенно важны максимальный ток и напряжение, называемые *амплитудными*. Обозначают их через  $I_m$  и  $U_m$ . Однако амплитудные значения для характеристики переменного тока часто бывают мало пригодны на практике.

Если, например, пропустить через электронагревательный прибор (например, кипятильник) последовательно постоянный ток силой в 2 А и переменный ток с амплитудным значением 2 А, то легко установить, что при переменном токе выделяется намного меньше теплоты, чем при постоянном токе. Это и понятно. Постоянный ток течет непрерывно с неизменной

силой, в то время как переменный ток достигает этой силы только в краткое мгновение его амплитудного значения, а во все остальное время его значение намного меньше.

Можно ввести понятие *действующего (эффективного) значения силы тока*, при котором сила переменного тока уравнивается с силой постоянного тока при сопоставлении их средних тепловых воздействий. Если обозначить действующие значения силы тока и напряжения (т.е. силу и напряжение эквивалентного постоянного тока) через  $I$  и  $U$ , то получим соотношения:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m; \quad (5)$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707 U_m. \quad (6)$$

В технике в большинстве случаев указывают действующие значения тока и напряжения. Так, напряжение в сети 220 В означает, что действующее напряжение составляет в осветительной сети 220 В. Но часто требуется все же принимать во внимание и амплитудное напряжение. Оно может, например, играть роль при выборе изоляции. Амплитудное значение напряжения в сети можно найти из формулы (6):

$$U_m = \frac{U}{0,707} = \frac{220}{0,707} = 311 \text{ В.}$$

амплитудное значение силы тока — из формулы (5):

$$I_m = \frac{I}{0,707}.$$

### **Индуктивность и емкость в цепи**

Закон Ома устанавливает важнейшие соотношения параметров электрической цепи. Но можно ли применять этот закон к электрическим цепям, в которых течет переменный ток?

Если в виде опыта подключить лампу накаливания, электрический утюг или другой электронагревательный прибор последовательно сначала к цепи постоянного тока, а затем к цепи переменного тока, имеющей действующие значения напряжения и тока, то легко установить, что закон Ома применим и к цепям переменного тока. Активное сопротивление и характеристики приборов не зависят от того, питаются ли они постоянным или переменным током.

Совсем другой результат можно получить, если провести подобный опыт с катушкой индуктивности, состоящей из большого количества витков и снабженной ферромагнитным сердечником. Если рассчитать сопротивление катушки по длине, сечению и материалу провода и соединить катушку с источником постоянного тока, то в цепи потечет ток, значение которого находится в полном соответствии с законом Ома.

Если же теперь подключить катушку индуктивности к источнику переменного тока с эквивалентным действующим значением напряжения, то сила тока в цепи заметно уменьшится. Она упадет еще больше, если вводить в катушку или выводить из нее ферромагнитный сердечник.

Очевидно, что к *активному сопротивлению*, вычисленному по закону Ома для цепи постоянного тока, при переменном токе прибавляется еще добавочное сопротивление. Его называют *индуктивным сопротивлением* ( $x_L$ ) или *реактивным*.

Это название указывает на причину индуктивного сопротивления. Оно вызывается самоиндукцией. Правило Ленца указывает, что э.д.с. самоиндукции всегда противодействует изменениям тока. При питании катушки индуктивности переменным током действие этой э.д.с. не ограничивается только процессами отключения или включения. В соответствии с законами, действующими в отношении переменного тока, непрерывно меняется магнитное силовое поле. Возникает постоянно действующая противо-э.д.с. (она также, само собой разумеется, является переменной), которая направлена навстречу току и создает как бы добавочное сопротивление.

Индуктивное сопротивление зависит прежде всего от свойств катушки индуктивности. Эти свойства, поскольку они относятся к самоиндукции, были кратко изложены при обсуждении явления индуктивности (см. стр. 118). Чем

больше индуктивность катушки, тем больше при данном переменном токе ее индуктивное сопротивление.

Действие самоиндукции, как всякой индукции, зависит также от того, с какой скоростью изменяется число силовых линий, пересекающих витки катушки. В нашем случае это означает, что противо-э.д.с. и индуктивное сопротивление растут с частотой переменного тока.

Обозначая индуктивность катушки  $L$  и частоту переменного тока  $f$ , получим для индуктивного сопротивления катушки следующее выражение:

$$x_L = 2\pi fL.$$

Так как  $f$  измеряется в секундах в минус первой степени, а  $L$  — в генри ( $1 \text{ Гн} = \frac{1 \text{ В} \cdot 1 \text{ с}}{1 \text{ А}}$ ), то индуктивное сопротивление

$$x_L = \frac{1}{\text{с}} \cdot \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}} = \frac{\text{В}}{\text{А}} = \text{Ом}$$

Следовательно, индуктивное сопротивление измеряется в омах.

**Пример.** Рассмотрим катушку индуктивности с ферромагнитным сердечником индуктивностью 5 Гн. При частоте переменного тока в сети 50 Гц индуктивное сопротивление этой катушки составит:

$$x_L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 5 = 1570 \text{ Ом}.$$

Если повысить частоту до 1000 Гц, то сопротивление

$$x_L = 2 \cdot 3,14 \cdot 1000 \cdot 5 = 31\,400 \text{ Ом}.$$

Часто бывает так, что катушки обладают очень низким активным сопротивлением, но в то же время их индуктивное сопротивление очень велико.

Если соединить источник переменного тока с нагрузкой, у которой нет индуктивного, а только "омическое" сопротивление, то появление максимальных значений и прохождение через нуль напряжения и тока будет всегда одновременным. В этом случае говорят, что напряжение и сила тока

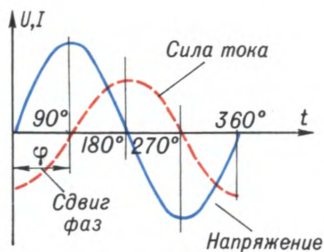


Рис. 82. Сдвиг фаз между током и напряжением в цепи с индуктивным сопротивлением

совпадают по фазе — ”синфазны”. Если же теперь подключить катушку индуктивности, то обнаруживается, что совпадения по фазе больше не существует. Сила тока достигает максимума позже, чем напряжение. Кривые напряжения и силы тока располагаются друг за другом (рис. 82). *Сдвиг фаз* между ними соответствует определенному углу поворота рамки в переменном магнитном поле и выражается в градусах или радианах.

При ”чистой” индуктивности, т.е. при индуктивности только с реактивным сопротивлением (без активного), сдвиг фаз составляет  $90^\circ$ . Сила тока, значит, отстает от напряжения на четверть поворота рамки. На практике этот угол всегда меньше, так как невозможно создать катушку без активного сопротивления.

Сдвиг фаз, таким образом, является следствием действия самоиндукции. Возникающая в катушке индуктивности противо-э.д.с. ”замедляет” течение тока.

Индуктивное сопротивление и сдвиг фаз очень важны для электротехники и энергетики, поскольку во многих электрических приборах (двигателях, генераторах, трансформаторах, электромагнитах и т.д.) используются катушки с большой индуктивностью.

Также и конденсатор ведет себя различно в зависимости от того, включен ли он в цепь постоянного или переменного тока.

Если соединить пластины конденсатора с источником постоянного тока, то в момент включения в цепи возникнет импульс тока. Это явление объясняется тем, что источник тока оттягивает электроны от одной пластины конденсатора и нагнетает на другую — конденсатор заряжается. Когда он

зарядился, то ток больше не течет (током утечки можно пренебречь). Для постоянного тока сопротивление конденсатора "бесконечно" велико.

Если подключить теперь конденсатор к источнику переменного тока, то в цепи потечет длительный ток. Конденсатор, "отключая" цепь постоянного тока, в цепи переменного тока является только сопротивлением.

Если к конденсатору подключить источник переменного тока, то в цепи непрерывно течет зарядный (разрядный) ток — конденсатор постоянно перезаряжается, его пластины попеременно меняют полярность с частотой переменного тока. Вследствие этого электроны непрерывно "качаются" в цепи. Это и есть переменный ток, и не имеет значения то, что фактически электрическая цепь в одном месте прервана диэлектриком.

От чего зависит *емкостное сопротивление* конденсатора? При данном источнике тока это сопротивление, очевидно, тем меньше, чем больше сила тока, протекающего в цепи переменного тока, т.е. чем больше электронов в единицу времени пересечет сечение провода в прямом и обратном направлениях. Это число увеличивается, если возрастает емкость конденсатора, так как увеличение емкости означает увеличение "площади" для большего числа зарядов (см. стр. 71). Если повышают частоту источника переменного тока, то происходит убыстрение движения электронов. Это увеличение движения равносильно увеличению количества электричества. Поэтому емкостное сопротивление конденсатора падает с ростом емкости и частоты приложенного переменного тока. Отсюда формула:

$$x_C = \frac{1}{2\pi fC}.$$

Так как  $f$  измеряется в секундах в минус первой степени, а  $C$  — в фарадах ( $1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{\text{В}} = \frac{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}}{1 \text{ В}}$ ), то емкостное сопротивление

$$x_C = \frac{1}{\frac{1}{\text{с}} \cdot \frac{\text{А} \cdot \text{с}}{\text{В}}} = \frac{\text{В}}{\text{А}} = \text{Ом}.$$



**Пример.** Какое сопротивление имеет конденсатор емкостью 10 мкФ при частоте переменного тока 50 Гц? Имеем:

$$x_C = \frac{1}{2,3,14 \cdot 50 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{2,3,14 \cdot 50 \cdot 10} \approx 319 \text{ Ом.}$$

При частоте в 1000 Гц емкостное сопротивление этого конденсатора

$$x_C = \frac{10^6}{2,3,14 \cdot 1000 \cdot 10} = 16 \text{ Ом.}$$

Как и индуктивное сопротивление, емкостное сопротивление тоже вызывает сдвиг фаз. Правда, на этот раз напряжение на конденсаторе отстает от силы тока. Это объясняется следующим. Когда к незаряженному конденсатору начинает "притекать" ток, то на его пластинах в первое мгновение еще нет никакого напряжения. Электрическая энергия источника в этих условиях проявляется в очень большой силе тока к конденсатору. С увеличением заряда начинает возрастать напряжение на конденсаторе, в то время как сила тока падает, так как теперь напряжение источника частично компенсируется напряжением, возникшим уже на конденсаторе. Когда, наконец, конденсатор зарядился, то зарядный ток больше не течет вовсе. Одновременно напряжение на конденсаторе достигает наивысшего значения. В цепи переменного тока этот процесс беспрестанно повторяется.

В цепи переменного тока, которая характеризуется емкостью, но в ней отсутствует и активное, и индуктивное сопротивления, сдвиг фаз составляет тоже  $90^\circ$ , правда, на этот раз с "опережающим" током. Так как в действительности каждый контур переменного тока обладает активным сопротивлением, то угол сдвига фаз находится между 0 и  $90^\circ$ .

Из-за незначительного емкостного сопротивления конденсаторы или подобные им устройства играют особую роль там, где необходимо использовать высокие частоты. Так, в высокочастотной технике уже емкость между двумя параллельно расположенными проводниками составляет очень существенную помеху. При переменных токах промышленной частоты неблагоприятно дает о себе знать емкость длинных кабелей или воздушных линий.

Индуктивное и емкостное сопротивления противодействуют друг другу в сдвиге фаз.

Следовательно, можно скомпенсировать сдвиг фаз совместным включением индуктивного и емкостного сопротивлений, причем "компенсируемая" индуктивность или емкость соответственно уравниваются. Правда, сдвиг фаз при данной индуктивности и емкости устраняется каждый раз только для определенной частоты.

### Мощность, коэффициент мощности и работа

В цепях постоянного тока потребляемая мощность определяется как произведение напряжения и силы тока, работа — как произведение мощности на время (см. стр. 27). В цепях переменного тока в большинстве случаев такой простой расчет невозможен.

Если цепь переменного тока содержит только активное сопротивление без индуктивного и емкостного, то полная мощность рассчитывается как произведение действующего напряжения и действующей силы тока, измеряемых вольтметром и амперметром. Таким образом, мощность  $P = UI$

Для работы получаем

$$A = UIt.$$

Точки при построении *кривой полной мощности* (рис. 83) получим перемножением соответствующих действующих значений напряжения и тока. Мощность всегда положительна,

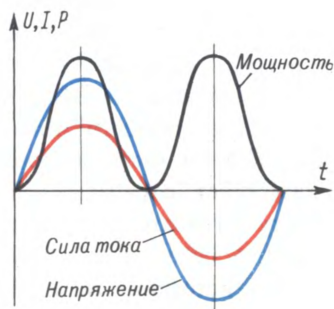


Рис. 83. Кривая мощности при совпадении фаз напряжения и тока

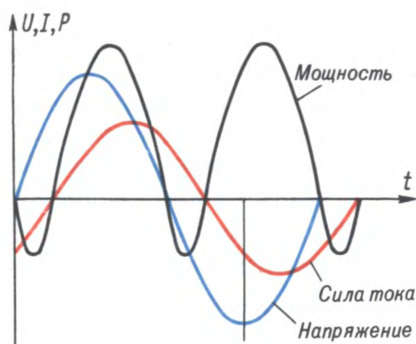


Рис. 84. Кривая мощности при сдвиге фаз между напряжением и током

так как в этом случае напряжение и ток постоянно имеют одинаковое направление: кривая всегда расположена выше оси времени (рис. 83).

Обычно в цепи переменного тока наряду с активным сопротивлением присутствует еще и индуктивное, а часто и емкостное реактивные сопротивления. Если сопоставить в такой цепи фактически *активную мощность* (которая может считаться как имеющаяся в распоряжении механическая мощность) с мощностью, которую получим, если перемножим значения, показанные вольтметром и амперметром, то указанное произведение каждый раз дает большую мощность, чем активная. Разница между указанной *полной мощностью* и используемой активной мощностью возникает из-за того, что ток и напряжение не всегда одинаково направлены вследствие наличия в цепи реактивных сопротивлений. При перемножении тока и напряжения теперь получаем также и отрицательные значения.

Это видно из рис. 84, на котором кривая мощности построена для "отстающего" тока (что часто имеет место на практике). Кривая частично проходит ниже оси времени, что соответствует "отрицательной" мощности.

Эту отрицательную мощность можно объяснить только тем, что здесь потребитель тока "возвращает обратно" мощность к источнику тока. Эту мощность называют *реактивной мощностью*.

Реактивная мощность характеризуется обменом энергией между потребителем и источником тока. Внешне эта энергия не проявляется, но ухудшает полезное действие тока. Реактивная мощность перестраивает магнитное поле включенных в цепь катушек или электрическое поле конденсаторов. При "исчезновении" этой мощности поля катушек и конденсаторов возвращают обратно запасенную ими энергию.

Итак, цепь переменного тока характеризуется тремя видами мощности.

*Полную мощность ( $S$ )* получают перемножением действующего напряжения на действующую силу тока. Единица полной мощности — вольт-ампер (В·А) или киловольт-ампер (кВ·А).

Мощность, которая фактически преобразуется в полезную мощность, называют *активной мощностью ( $P$ )*. Единица активной мощности, как и мощности постоянного тока, — ватт (Вт), киловатт (кВт) или мегаватт (МВт).

*Реактивной мощностью ( $Q$ )*, наконец, является та часть мощности, которая характеризуется обменом энергией между источником тока и потребителем. Единица реактивной мощности — вольт-ампер реактивный (вар).

В соответствии с введенными нами понятиями активной и реактивной мощности представим себе полный (действующий) ток разделенным на две части: *активный ток ( $I_a$ )*, совершающий полезную работу, и *реактивный ток ( $I_p$ )*, ответственный за возникновение и исчезновение магнитных и электрических полей.

Но полный ток не является простой алгебраической суммой реактивного и активного токов. Решающую роль в определении полного тока играет сдвиг фаз между током и напряжением. Полный ток состоит из двух компонентов. Один, активный, ток имеет одинаковое направление с действующим напряжением — совпадает, следовательно, с ним по фазе. Другой, реактивный, ток сдвинут по фазе на  $90^\circ$  по отношению к активному току.

Чтобы определить активную и реактивную составляющие тока используют метод, применяемый в механике для разложения сил на компоненты.

Сначала откладывают напряжение в виде вектора, т.е. в виде физической величины, имеющей значение и направление, модуль которого соответствует действующему напряжению. Из начальной точки вектора напряжения проводят вектор действующей силы тока под углом  $\varphi$ , который соответствует сдвигу фаз между действующим напряжением и действующей силой тока. Тогда проекция вектора силы тока на направление вектора напряжения дает активную составляющую тока, а проекция вектора силы тока на перпендикулярное к активной составляющей направление дает реактивную составляющую тока.

Полный ток, следовательно, получается как геометрическая сумма активной и реактивной составляющих тока. По теореме *Пифагора* получаем:

$$I^2 = I_a^2 + I_p^2.$$

Из рассмотрения прямоугольного треугольника также видно, что реактивная составляющая тока тем больше, чем больше угол сдвига  $\varphi$ .

Два крайних случая при фазовом угле  $\varphi$ , равном 0 и  $90^\circ$ , практически могут реализоваться только в приближении.

При  $\varphi = 0$ , отсутствует реактивная составляющая тока. Активная составляющая тока и действующий ток равны. Это случай, когда в цепи нет емкостных и индуктивных сопротивлений.

При сдвиге фаз  $\varphi = 90^\circ$  (сопротивление чисто индуктивное или емкостное) вовсе нет активной составляющей тока и активной мощности. В этом случае в цепи присутствует только реактивная составляющая тока — электрический контур не отдает энергии.

Можно легко рассчитать активную  $I_a$  и реактивную  $I_p$  составляющие тока по действующему значению тока с помощью угла сдвига фаз. На основе простейших тригонометрических расчетов из треугольника *ABC* (рис. 85) находим:

$$\cos \varphi = \frac{I_a}{I}, \quad \sin \varphi = \frac{I_p}{I};$$

$$I_a = I \cos \varphi, \quad I_p = I \sin \varphi.$$

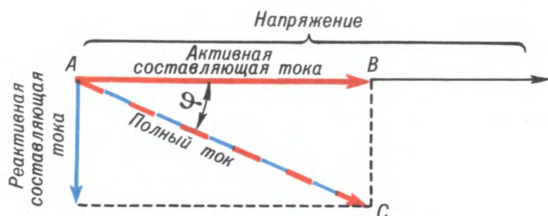


Рис. 85. Графическое определение активной и реактивной составляющих тока

Особенно важен в электротехнических расчетах косинус угла сдвига фаз. Ниже приведены значения  $\cos \varphi$ , которые наиболее часто встречаются в практических расчетах, при соответствующих значениях  $\varphi$  (в градусах) :

$\varphi$ . . . . .	0	10	20	30	40
$\cos \varphi$ . . . .	1,0000	0,9848	0,9397	0,8660	0,7660
$\varphi$ . . . . .	50	60	70	80	90
$\cos \varphi$ . . . .	0,6423	0,5000	0,3420	0,1736	0,0000

**Пример.** На зажимах двигателя прибор показал ток 20 А. Каково значение активного тока при угле сдвига фаз  $\varphi = 20^\circ$ ?

$$I_a = I \cos \varphi = 20 \cdot 0,9397 = 18,79 \text{ А.}$$

Выражение для мощности  $P$  можно, очевидно, записать как произведение действующего напряжения и активного тока:

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

Чтобы получить активную мощность  $P$ , необходимо полную мощность  $S$ , которую определяют как произведение действующих значений  $U$  и  $I$ , умножить еще на косинус угла сдвига фаз. Для работы соответственно получим выражение

$$A = UI \cos \varphi t.$$

Косинус угла сдвига фаз указывает, на какое число мы должны умножить полную мощность, чтобы получить активную мощность. Поэтому косинус угла сдвига фаз называют также "коэффициентом мощности".

**Пример.** Какова полная  $S$  и активная  $P$  мощность двигателя (из предыдущего примера), если напряжение в цепи составляет 220 В?

$$S = UI = 220 \cdot 20 = 4400 \text{ В}\cdot\text{А} = 4,4 \text{ кВ}\cdot\text{А};$$

$$P = 220 \cdot 20 \cdot 0,9397 \approx 4135 \text{ Вт} \approx 4,135 \text{ кВт}.$$

Так как выше значение активной составляющей тока уже было рассчитано (18,79 А), можно умножить это значение и напряжение в цепи. Результат будет тот же.

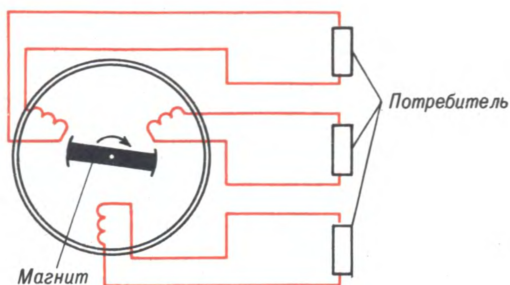
Полная мощность всегда больше активной мощности, так как протекающий в проводнике ток больше активной составляющей тока. Отношение активной мощности к полной, т.е. коэффициент мощности, тем лучше, чем ближе значение коэффициента мощности к 1. Это имеет место при малом сдвиге фаз. При неизменной мощности генератора или электростанции получаемая активная мощность тем больше, чем "лучше" коэффициент мощности. И наоборот, для получения определенной активной мощности можно ограничиться тем меньшей полной мощностью, чем лучше коэффициент мощности. Следовательно, параметры цепи с коэффициентом мощности, близком к 1 ( $\varphi \approx 0^\circ$ ), способствуют удешевлению систем энергоснабжения и повышению их экономичности.

Так как индуктивностей и реактивных составляющих тока не избежать, то для улучшения коэффициента мощности применяют специальные устройства, например: можно включить параллельно с потребителем тока конденсатор с рассчитанными параметрами, который полностью или частично компенсирует сдвиг фаз. Другие возможности будут рассмотрены ниже (см. стр. 185).

### Трехфазный ток — вращающий ток

Переменное напряжение получают путем вращения в магнитном поле проводника в виде рамки, которую, естественно, можно заменить катушкой. Однако поступают и наоборот: переменное напряжение возникает и тогда,

Рис. 86. Получение трехфазного переменного тока



когда магнит вращают внутри катушки. Это даже удобнее, так как вызванный индуцированным напряжением ток может сниматься без контактных колец.

Что случится, если вместо одной катушки взять три таких же, расположенных равномерно по кругу (рис. 86)? Теперь напряжение индуцируется в каждой катушке. Оно будет равным по значению, если предположить, что длина и число витков катушек одинаковы. Если эти напряжения должны питать цепи потребителей, то потребуется в совокупности шесть проводников.

Между напряжениями, которые индуцируются в трех катушках, устанавливается взаимосвязь. Отдельные *фазные напряжения*, обусловленные расположением катушек и равномерным вращением магнита, сдвинуты относительно друг друга на  $120^\circ$ . Кривые таких напряжений и токов приведены на рис. 87, а.

Если сложить в любой момент времени напряжения или токи отдельных фаз (рис. 87, б), учитывая направление тока, то получим замечательный результат: сумма напряжений или токов в каждый момент равна нулю при равной нагрузке фаз. Поэтому можно три катушки соединять друг с другом, не опасаясь короткого замыкания.

Можно поэтому трех потребителей электроэнергии подключить так, как показано на рис. 88. Вместо шести проводников имеем теперь три *линейных провода*, которые питаются от начальных витков катушек. Для возвратных токов служит нулевой провод (*общая нейтраль*), который соединяет нейтральные точки генератора и потребителя.



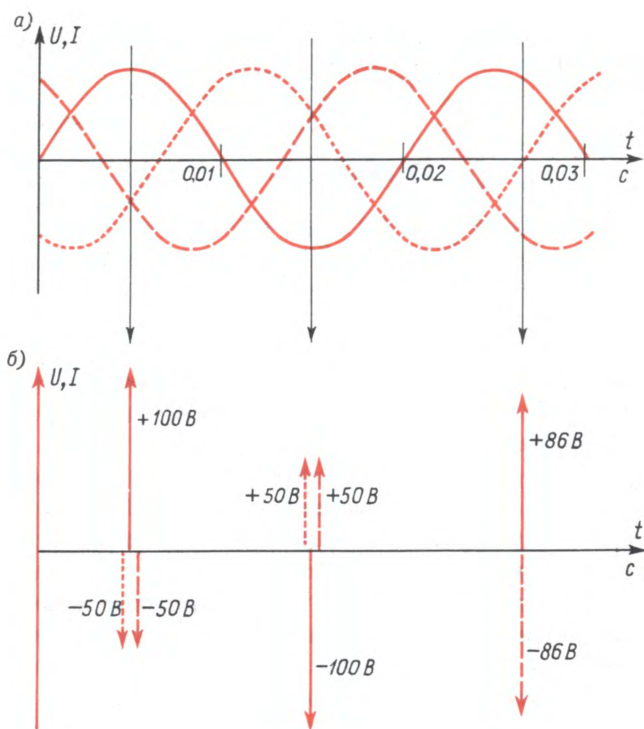


Рис. 87. Кривые фазных напряжений и токов (а) и мгновенные значения напряжений (б)

Если три потребителя тока отбирают каждый одинаковую энергию, то ток в нейтрали уничтожается, она остается обесточенной. Ее можно отключить. Если же три фазы нагружаются неравномерно, то в нейтрали течет только относительно слабый уравнивающий ток.

Следовательно, имеется электрически связанная трехфазная система. В этом случае говорят о *взаимосвязанном трехфазном переменном токе*.

Такое соединение обмоток называют *звездой*. В этой системе имеются два различных напряжения: между нулевым проводом и любым из трех линейных проводов ("фаз") — *фазное напряжение* (это напряжение, которое индуцируется

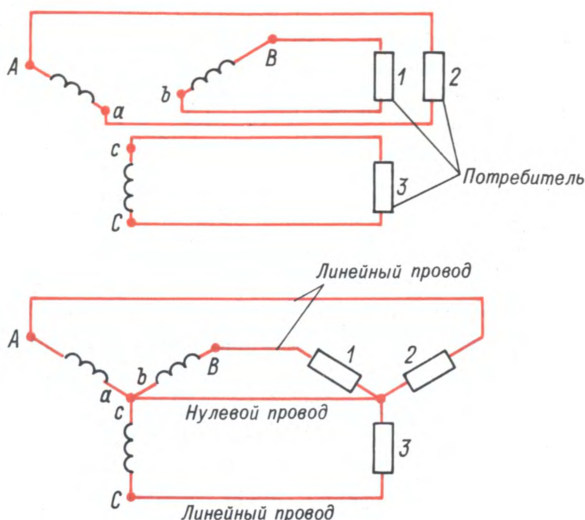


Рис. 88. Соединение звездой ( $a, b, c$  — концы катушек;  $A, B, C$  — начала катушек)

в какой-либо из катушек "секций" генератора); между любыми двумя линейными проводами — *линейное напряжение*. При таком включении какие-либо две катушки "секции" оказываются соединенными последовательно. Но линейное напряжение не является алгебраической суммой напряжений отдельных катушек. Напряжения должны складываться геометрически, так как магнитному полю требуется определенное время, чтобы распространиться от одной катушки до следующей.

Обозначив фазное напряжение  $U_{\phi}$ , а линейное —  $U_{\text{л}}$ , получим:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\phi} = 1,73 U_{\phi}.$$

**Пример.** Если фазное напряжение составляет 220 В, то линейное напряжение

$$U_{\text{л}} = 1,73 \cdot 220 = 380 \text{ В}.$$



Рис. 89. Соединение треугольником

Этот расчет объясняет очень распространенное соотношение напряжений "220/380 В" в многочисленных распределительных сетях.

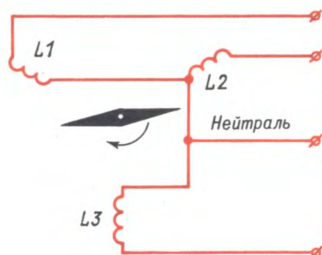
Существует еще одно возможное соединение обмоток — это соединение *треугольником* (рис. 89), при котором конец какой-либо из катушек соединяется с началом следующей катушки. В этом случае может сниматься напряжение между началом и концом катушки. Следовательно, это напряжение, которое соответствует напряжению, индуцированному в какой-либо из катушек.

Сила же *линейного тока*  $I_{\text{л}}$  больше силы фазного тока  $I_{\text{ф}}$ , протекающего через катушку, так как каждая катушка здесь соединена параллельно с двумя другими, последовательно соединенными катушками. Складывая силы тока геометрически, получим

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}} = 1,73 I_{\text{ф}}.$$

Преимущества трехфазного переменного тока неоспоримы. В нашем распоряжении имеется два напряжения при соединении обмоток звездой. К тому же, генератор трехфазного переменного тока значительно меньше генератора однофазного переменного тока такой же мощности. Еще одним существенным преимуществом, которое особенно способствовало внедрению трехфазного переменного тока, явилось то обстоятельство, что изготовление двигателей трехфазного тока оказалось весьма простым делом. Основному принципу работы этих двигателей трехфазный переменный ток обязан широко распространенным названием *вращающий ток*.

Рис. 90. Принцип работы двигателя переменного тока



Если расположить три катушки так, чтобы их оси составляли относительно друг друга угол  $120^\circ$ , соединить начала и концы катушек в звезду, подключить к трехфазному генератору и поместить между катушками магнитную стрелку (рис. 90), то она будет непрерывно вращаться с равномерной скоростью, пока работает генератор.

Из условий возникновения трехфазного переменного тока известно, что напряжения и токи отдельных "фаз" сдвинуты во времени на  $120^\circ$ . Соответственно также и в катушках "двигателя" максимальные значения напряжения возникают не одновременно, а последовательно (одно за другим). Если в определенный момент сильное магнитное воздействие приходится на катушку  $L1$ ; то в следующее мгновение (после соответствующего изменения положения) это воздействие придется на катушку  $L2$ , несколько позже — на катушку  $L3$ , затем опять — на  $L1$  и т.д. — в точном соответствии с ритмом вращения ротора в генераторе.

Следовательно, в пространстве между катушками нашего двигателя наблюдается не установившееся магнитное поле, которое остается неизменным по направлению, а результирующее *вращающееся магнитное поле*. Магнитная стрелка участвует в этом вращении и становится простейшим электродвигателем. На использовании вращающегося магнитного поля основана работа электродвигателей переменного трехфазного тока.

## Генераторы переменного и постоянного тока

При рассмотрении явлений индукции и переменного трехфазного тока было установлено, что существуют два способа для получения индукционного тока с помощью вращения: можно вращать рамку из проводника или катушку в магнитном поле и можно вращать магнит при неподвижной индукционной катушке.

Если вращается индукционная катушка между полюсами магнита — это *явнополюсная машина* (рис. 91, а) с внешними полюсами. И наоборот, генератор, у которого магнитные полюсы вращаются между неподвижными индукционными катушками, называется *неявнополюсной машиной* (рис. 91, б) — машиной с неявно выраженными полюсами.

При выработке электроэнергии предпочитают неявнополюсные машины. Это вызвано следующим. У этой машины "вырабатывающая энергию" часть неподвижна, съем больших

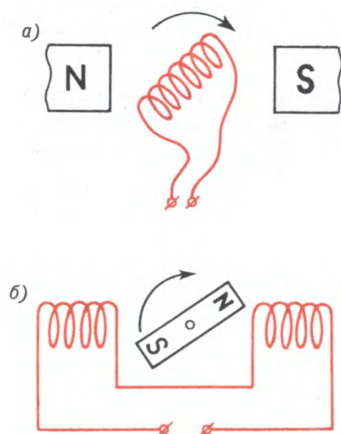


Рис. 91. Принцип работы явнополюсной (а) и неявнополюсной (б) машины

электрических мощностей нетруден. У явнополусных машин, наоборот, приходится отводить электроэнергию от вращающихся индукционных катушек через контактные кольца и щетки. При больших мощностях это создает непреодолимые трудности.

Постоянные магниты могут применяться только для генераторов небольшой электрической мощности (например, в ручных фонариках и т.д.). При больших мощностях вместо постоянных магнитов используют электромагниты, которые питаются постоянным током. К ротору такого генератора *напряжение возбуждения* подается тоже, конечно, через контактные кольца. Это сравнительно просто, так как *мощность возбуждения* намного меньше, чем мощность, отдаваемая генератором.

Частота вырабатываемого переменного тока зависит прежде всего от частоты вращения ротора генератора. Если ротор делает 10 или 20 оборотов в секунду, то получаем переменное напряжение и ток частотой 10 или 20 Гц.

На частоту также влияет число *пар полюсов* у вращающегося ротора. У ротора с тремя парами полюсов (рис. 92) достаточно уже трети оборота ротора, чтобы получить полную волну переменного напряжения. При четырех парах полюсов

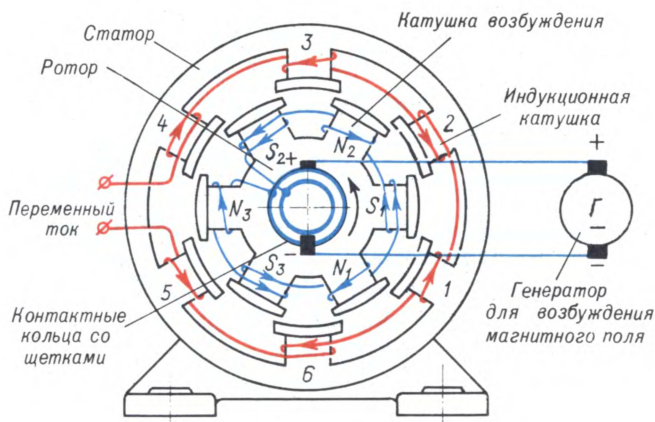


Рис. 92. Неявнополусный генератор с тремя парами полюсов

достаточно четверти оборота и т.д. В обобщенном виде имеем:

$$f = pn,$$

где  $p$  — число пар полюсов;  $n$  — частота вращения ротора, об/с;  $f$  — частота переменного напряжения, Гц. Следовательно, имеются две возможности для изменения частоты тока генератора: повышать или снижать частоту вращения ротора или изменять число пар полюсов. На практике используют обе возможности.

Генераторы для выработки энергии исполняются почти исключительно как неявнополюсные машины переменного тока. Их "статор", который несет индукционные катушки, представляет собой кольцевой сердечник. Он состоит из отдельных специальных пластин, друг от друга изолированных, чтобы воспрепятствовать возникновению сильных вихревых токов. Параллельно оси генератора в статоре монтируются пазы. В них помещают необходимые для выработки трехфазного переменного тока три катушки или группы катушек, которые при мощностях во много тысяч киловольт-ампер, как правило, заменяются медными шинами.

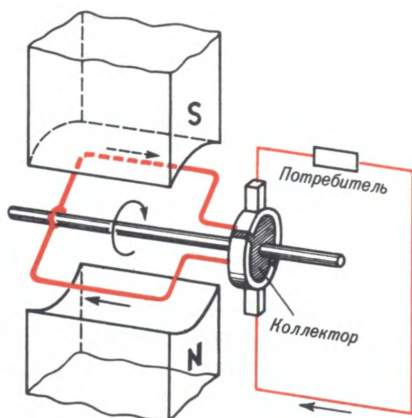
Ротор генератора не требует сборки из отдельных пластин, так как в нем магнитное поле не меняется, а "вращается" вместе с ротором.

Большинство генераторов приводится в движение паровыми или водяными турбинами. Паровые турбины намного быстрее. Так как паровая турбина соединяется непосредственно с генератором, то ротор собирают под ту же частоту вращения. Но этим определяется и частота тока, вырабатываемого генератором. Поэтому для *турбогенераторов* в общем случае выбирают только двухполюсные роторы. Как показывает вышеприведенная формула, он должен совершать 50 оборотов в секунду или 3000 в минуту, чтобы частота тока в сети составляла 50 Гц.

При такой частоте вращения на ротор воздействует большая центробежная сила. Так как она растет с увеличением диаметра ротора, то роторам турбогенераторов придают вытянутую цилиндрическую форму. В соответствии с этим должен выполняться также и статор.

Многие виды водяных турбин тихоходнее паровых. Если хотят избежать потерь энергии при механической передаче

Рис. 93. Принцип работы генератора постоянного тока



и соединить турбину непосредственно с генератором, то необходимо компенсировать низкое число оборотов большим числом пар полюсов. Поэтому в *гидрогенераторах* на гидроэлектростанциях вместо вытянутых роторов обычно используют плоские "полюсные колеса", на периферии которых расположены магнитные полюсы с обмотками возбуждения.

Ток возбуждения для магнитных полюсов у всех генераторов большой мощности подается от специального генератора постоянного тока — *возбудителя*. Он размещен, как правило, на валу генератора и приводится во вращение основной турбиной.

Теперь следует рассмотреть работу генератора постоянного тока, принцип работы которого схематически изображен на рис. 93. Схема этого генератора отличается от схемы генератора переменного тока (рис. 80) только тем, что рамка из проводника здесь соединяется не с двумя контактными кольцами для съема тока, а с полуцилиндрическими сегментами *коллектора*.

Коллектор служит следующим целям. Как известно, при вращении в петле проводника индуцируется переменное напряжение ("нев्यпрямленный ток") — рис. 94. Однако благодаря сегментам коллектора концы катушки с внешней цепью переключаются после каждого полуоборота. В момент переключения при соответствующем положении сегментов и электрощеток, служащих для токосъема, переменное



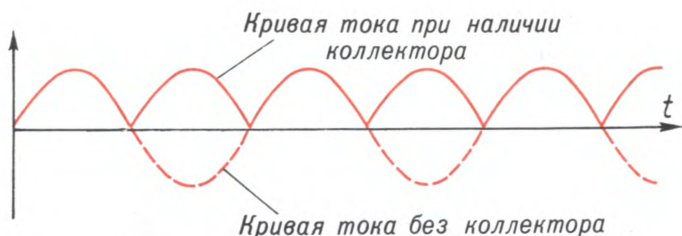


Рис. 94. Влияние коллектора на кривые тока

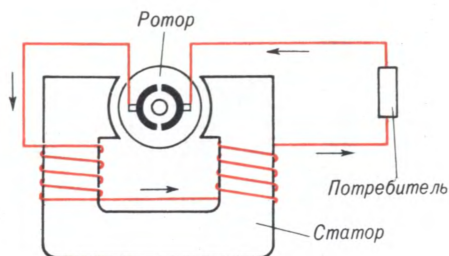
напряжение меняет направление точно в конце полуволны. Вследствие этого "нижняя" полуволна переменного тока "опрокидывается". Хотя в петле проводника по-прежнему индуцируется переменное напряжение, во внешней цепи имеются полуволны только одного направления. Во внешней цепи тем самым создается постоянный пульсирующий ток.

Он имеет с постоянным током то общее, что течет все время в одном направлении (например, как ток от аккумуляторных батарей), хотя напряжение и сила его непрерывно меняются. Такой ток называют "пульсирующим постоянным током". Соответствующим включением генератора пульсацию можно существенно уменьшить.

Генераторы постоянного тока конструируют, как явно-полюсные машины. Конечно, для генераторов больших мощностей отказываются от постоянных магнитов, заменяя их электромагнитами. Естественно, возникает вопрос, откуда можно взять мощность для возбуждения. Конечно, было бы нецелесообразно применять для этого аккумуляторную батарею или еще одну машину постоянного тока. Да в этом и нет необходимости. Здесь обращаются к сформулированному Эрнстом Вернером Сименсом (1816—1892) принципу: обмотку ротора соединяют с обмоткой статора ("обмоткой возбуждения") так, чтобы машинный ток, прежде чем оставить машину, прошел обмотку возбуждения. Тогда машина возбуждает сама себя.

После того как машина была в работе и магниты возбуждения отключены, их магнетизм исчезает не полностью. Они всегда сохраняют известный остаточный магнетизм. Он достаточен для того, чтобы при последующем разгоне генератора в роторе индуцировалось бы сразу же небольшое напряжение.

Рис. 95. Генератор последовательного возбуждения



Это вызывает ток в обмотке возбуждения и во внешней цепи. Если обмотки возбуждения соединены правильно, то этот ток усиливает магнитное поле статора. Вследствие этого индуцируется теперь высокое напряжение, которое повышает ток в витках катушки возбуждения и во внешней цепи. Большие токи усиливают магнитное поле и т.д. Этот процесс самовозбуждения закончится, когда характеристики машины достигнут установленной электрической мощности. Внешнего возбуждения при этом не требуется.

Схематически изображенный на рис. 95 генератор называют *генератором последовательного возбуждения* или *сериесным*, так как обмотки его ротора и статора соединены последовательно. Однако имеются и другие возможности соединения. Например, можно обмотки ротора и обмотки возбуждения соединить параллельно, так чтобы только часть машинного тока протекала через обмотки возбуждения. В этом случае имеем дело с *генератором параллельного возбуждения* (*шунтового возбуждения*).

## Трансформаторы

Генераторы вырабатывают ток напряжением до 10 кВ, если не принимать особых дорогостоящих мер по улучшению изоляции. Для передач электроэнергии на дальние расстояния (см. стр. 193) это напряжение является низким, а для использования непосредственно на предприятиях в большинстве случаев оно слишком высоко. Следовательно, необходимо найти способ без потерь повышать и понижать напряжение тока генератора. Преобразовывать напряжения требуется

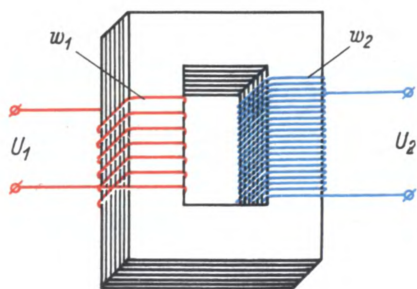


Рис. 96. Устройство трансформатора переменного напряжения

также во многих других случаях, например в технике связи.

Для преобразования переменного напряжения в нашем распоряжении имеется трансформатор, являющийся простым и экономичным прибором (рис. 96). На замкнутый сердечник намотаны две катушки, которые друг с другом не соединяются. Если подключить источник переменного тока к *первичной обмотке*, то возникает магнитное поле, сила и направление которого будут меняться с частотой первичного тока. Силовые линии этого поля проходят обычно внутри ферромагнитного сердечника (магнитопровода), кроме отдельных *линий рассеяния*. Число силовых линий, охватываемых *вторичной обмоткой*, изменяется с частотой первичного тока. Поэтому во вторичной обмотке индуцируется переменное напряжение такой же частоты, как первичное напряжение. Причиной возникновения вторичного напряжения является магнитное переменное поле первичной обмотки. Оно отсутствует, если к первичной обмотке подведен постоянный ток. Только при включении и отключении изменяется число силовых линий электромагнитного поля, и в эти мгновения индуцируется импульс напряжения во вторичной обмотке (см. стр. 107). Поэтому трансформатор не может преобразовывать постоянный ток.

Отношение между первичным и вторичным напряжением выводится из следующих соображений. Переменный магнитный поток вызывает напряжение в обеих катушках (в первичной и вторичной). При этом индуцированное напряжение зависит от скорости изменения магнитного потока катушки (числа силовых линий) и от числа витков катушки. Так как

скорость изменения магнитного потока для обеих катушек одинакова и обе катушки поэтому пересекаются одинаковым числом силовых линий, то степень преобразования напряжения зависит только от числа витков. Если пренебречь незначительным сопротивлением первичной катушки, то получим индуцированное напряжение, равное по значению приложенному напряжению, но обратное по направлению (см. стр. 117). Из этого следует важное соотношение:

*Напряжения в катушках ненагруженного трансформатора относятся друг к другу как числа витков:*

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

В катушке с большим числом витков возникает высокое напряжение, поэтому ее называют "стороной высокого напряжения" трансформатора — вторичной обмоткой высшего напряжения. Соответственно катушку с меньшим числом витков называют "стороной низкого напряжения" трансформатора. Этим же определяется "коэффициент трансформации" и трансформатора:

$$n = \frac{\text{Число витков в вторичной обмотке}}{\text{Число витков первичной обмотки}} \quad \text{или}$$

$$n = \frac{w_{\text{в}}}{w_{\text{п}}}.$$

**Пример.** Какое напряжение возникнет во вторичной обмотке трансформатора, если она имеет 10 000 вит., а к первичной обмотке с 1250 вит. приложено напряжение 200 В?

Имеем:

$$U_2 = U_1 \frac{w_2}{w_1} = 200 \frac{10\,000}{1250} = 1600 \text{ В.}$$

Если нагрузить трансформатор, т.е. соединить зажимы вторичной обмотки с потребителем, то должны получить

на стороне высокого напряжения ту же мощность, которую затратили на стороне низкого напряжения (пренебрегаем потерями трансформатора). Из этого следует важное соотношение для токов обмоток:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1}.$$

Следовательно, с помощью трансформатора можно получать высокие напряжения и малую силу тока, а также низкое напряжение и большую силу тока.

В качестве к.п.д. трансформатора принимают отношение вторичной мощности к первичной:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

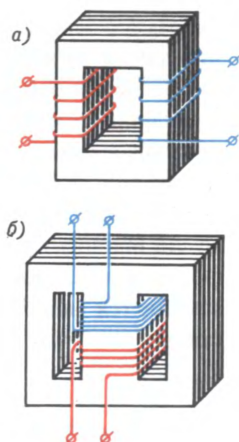
К.п.д. трансформатора по сравнению с другими машинами очень велик и составляет от 96 до 99% мощности, переданной с обмотки низшего напряжения на обмотку высшего напряжения. Отклонение от идеального случая (при  $\eta = 100\%$ ) объясняется неизбежными потерями в самом трансформаторе. Например, в проводнике обмоток происходят "потери в меди". Эти потери связаны с тем, что обмотки обладают известным сопротивлением и нагреваются при прохождении тока.

В сердечнике трансформатора возникают потери от вихревых токов. Снижают эти потери тем, что набирают сердечник из отдельных, изолированных друг от друга листов.

Элементарные магнитики сердечника трансформатора постоянно поворачиваются в направлении переменного магнитного поля. На это идут известные затраты энергии, которые рассматривают как *потери на гистерезис* (см. стр. 85). Их снижают тем, что выбирают для листов сердечника материал, который требует незначительных затрат энергии на перемагничивание.

При конструировании трансформатора заботятся прежде всего о том, чтобы рассеяние магнитных силовых линий было незначительным и чтобы фактически все силовые линии проходили через вторичную обмотку. В принципе различают

Рис. 97. Устройство однофазного стержневого (а) и броневое (б) трансформаторов



две основные конструкции трансформаторов: *стержневой* (рис. 97, а) и *броневой* (рис. 97, б).

Первичная и вторичная обмотки, как правило, не отделяются друг от друга (см. рис. 96). В трансформаторах с *цилиндрической обмоткой* витки обмотки кладут друг на друга; в трансформаторах с *дисковой обмоткой* витки обмотки высокого и низкого напряжения разделяются и формируются в дискообразные катушки.

До сих пор обсуждались и приводились конструкции *однофазных* трансформаторов. Если необходимо трансформировать трехфазный ток, то можно использовать три таких однофазных трансформатора, с тем чтобы каждый из них преобразовывал ток одной фазы. Однако в большинстве случаев применяют специальный трехфазный трансформатор, на магнитопровод которого помещают три обмотки высокого напряжения и три обмотки низкого напряжения. Для соединения их имеется много вариантов. Так, можно соединять обмотки высокого напряжения в звезду, обмотки низкого напряжения, наоборот, в треугольник. Можно и на первичной и на вторичной стороне использовать соединение звездой и т.д.

Каждый трансформатор при работе нагревается. При больших мощностях эта теплота должна быстро отводиться. Например, можно оснастить трансформатор охлаждающими

ребрами с тем, чтобы отвод теплоты шел в воздух. Охлаждение также можно усилить обдуванием холодным воздухом. Особенно широко применяются *масляные трансформаторы*. Трансформатор целиком помещается в бак, заполненный обезвоженным жидким минеральным маслом. Дополнительно бак снабжается большим числом охлаждающих ребер, чтобы усилить отвод теплоты излучением. Кроме охлаждения, масло приносит еще ту пользу, что улучшает изоляцию трансформатора. В последнее время масло все больше и больше заменяется невоспламеняющимися охлаждающими жидкостями.

### Двигатели постоянного тока

Машины, преобразующие электрическую энергию в механическую, находят широкое применение в промышленных, транспортных и других установках: гигантские землечерпалки, подъемные мосты и крохотные часы, тяжелые локомотивы товарных поездов и игрушечные автомобили, пылесосы и винты атомного ледокола "Ленин".

Принцип действия электродвигателя был рассмотрен выше. На каждый проводник, который находится в магнитном поле, оказывают воздействие механические силы. Они могут вызывать и вращательное движение, что продемонстрировал прибор с подвижной катушкой (см. стр. 104). Конечно, при обычном устройстве прибора с подвижной катушкой невозможно достичь поворота более чем на  $180^\circ$ ; затем движение прекращается, так как разноименные полюсы *обмоток возбуждения* и *якоря (ротора)* оказываются противостоящими.

Двигатель же должен совершать непрерывное вращение. Это достигается специальными мерами. В момент когда разноименные полюсы якоря и обмотки возбуждения оказываются друг против друга переключается направление тока в якоре на обратное. При этом тотчас меняются также полюсы якоря: северный полюс становится южным, южный полюс — северным. Вследствие этого в момент наибольшего сближения притяжение между полюсами обмотки возбуждения и обмотки

якоря переходит в отталкивание. Якорь вращается дальше. Если направление тока переключают снова через каждые  $180^\circ$  поворота, то якорь вращается непрерывно. Переключение направления тока осуществляет сам двигатель. Для этой цели на оси его якоря расположен такой же коллектор, как и рассмотренный нами у генератора постоянного тока. После половины оборота якоря коллектор переключает подводимый к обмотке якоря ток так, что во время последующего полуоборота якоря ток течет в обратном направлении.

В качестве магнитов возбуждения постоянные магниты применяются только в двигателях очень малой мощности. Подавляющее же большинство всех двигателей оснащены электромагнитами (см. рис. 98).

Для того чтобы двигатель работал равномерно, якорь снабжают большим числом уложенных друг против друга обмоток, которые закрепляют в пазах якоря. Концы витков обмоток подсоединяются к пластинам коллектора, расположенным друг против друга. В реальной машине имеется большое число витков и коллекторных пластин.

При подключении двигателя к источнику питания ток сначала течет через обмотку якоря, причем намного превосходит номинальный ток. Это явление имеет следующую причину: во вращающемся якоре индуцируется э.д.с., как в генераторе. По правилу Ленца она направлена против напряжения, движущего якорь. Так как индуцируемая э.д.с. зависит от того, как быстро меняется число охватываемых контуром силовых линий, то на значение противо-э.д.с. решающее влияние

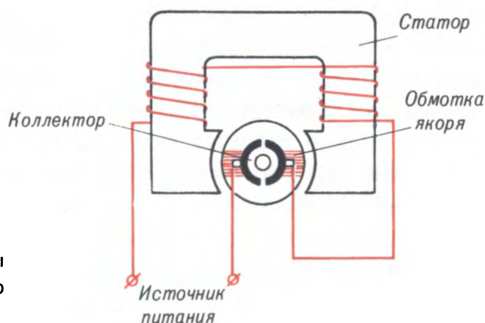


Рис. 98. Принцип работы двигателя постоянного тока



оказывает частота вращения двигателя. Противо-э.д.с. исчезает в момент переключения. Следовательно, приложенное к якору извне напряжение сети гонит через обмотки якоря очень сильный пусковой ток. Если ротор приводить в движение постепенно, то сначала возникает небольшая, затем возрастающая противо-э.д.с. В итоге, следовательно, э.д.с. якоря уменьшается, сила пускового тока якоря падает.

Пусковой ток может достигать значения, в 20 раз превышающего номинальный рабочий ток. Поэтому было бы крайне нерасчетливо так конструировать двигатели и их источники питания, чтобы сразу же не ограничивать высокие пусковые токи. Большие возможности для ограничения роста тока предоставляют *пусковые реостаты* машин постоянного тока. Это регулировочные реостаты, которые включены в цепь двигателя так, чтобы через них протекал ток якоря. При включении двигателя сначала действует полное сопротивление реостата: он снижает подводимое к якору напряжение. С увеличением частоты вращения двигателя и ростом противо-э.д.с. сопротивление реостата может постепенно уменьшаться. Он полностью выключается, когда двигатель выходит на режим максимальной частоты вращения.

У двигателей очень небольшой мощности (бытовые приборы, игрушки) от пусковых реостатов можно отказаться. С помощью электронных приборов сегодня процесс пуска можно полностью автоматизировать.

Различают три вида двигателей постоянного тока: *машины последовательного возбуждения* (серийные), *параллельного возбуждения* (шунтовые) и *смешанного возбуждения* (компаундные).

У двигателей последовательного возбуждения обмотка якоря и обмотка возбуждения включены последовательно друг за другом. Напряженность магнитного поля при этом повышается. Двигатель обладает высоким "пусковым моментом" и плавно набирает скорость под большой нагрузкой. Изменение нагрузки непосредственно сказывается на частоте вращения. Двигатель вращается тем медленнее, чем больше нагружен. Если же он внезапно разгружается, то "идет в разнос". Частота вращения возрастает настолько, что у мощных двигателей возникающие центробежные силы могут разрушить

якорь. При нагрузке возрастают частота вращения и противо-э.д.с. в якоре, которая уменьшает ток, подводимый к двигателю. Вследствие этого снижается напряженность магнитного поля, падает противо-э.д.с. Чтобы скомпенсировать это "ослабление" магнитного поля, якорь вновь повышает частоту вращения. Этот процесс усиливается, пока не разрушится двигатель.

Двигатели последовательного возбуждения особенно пригодны в тех случаях, когда требуются большие пусковые усилия и отсутствует опасность полной разгрузки двигателя. Они используются в качестве тяговых двигателей в трамваях, поездах метро, в качестве приводных двигателей подъемных кранов, лифтов, прокатных станов и т. д.

Если требуется изменить направление вращения двигателя последовательного возбуждения, достаточно поменять местами полюсы обмотки возбуждения или обмотки якоря. При изменении полюсов и в обмотке возбуждения, и в обмотке якоря направление тока в двигателе не изменится.

Для привода станков требуется двигатель, частота вращения которого мало изменялась бы при изменении нагрузки и могла бы легко регулироваться. Этим требованиям отвечает двигатель параллельного возбуждения. Поступающий к двигателю ток распределяется между якорем и обмотками возбуждения. Пусковой ток не зависит от нагрузки и частоты вращения двигателя и создает постоянное магнитное поле неизменной напряженности. Чтобы по возможности уменьшить ток в обмотках возбуждения, их изготавливают из большого числа витков тонкого провода.

Пусковой реостат регулирует здесь только ток якоря. Если двигатель сильно нагружается, то уменьшаются частота вращения и противо-э.д.с. Сила тока якоря растет, а это приводит при постоянном магнитном поле вновь к повышению частоты вращения.

Опасности "разноса" при разгрузке двигателя здесь нет, так как напряженность магнитного поля не изменяется при увеличении частоты вращения.

Чтобы изменить направление вращения двигателя, требуется поменять местами полюсы обмотки якоря или обмотки возбуждения. Если обмотка возбуждения соединяется

с регулировочным реостатом, то можно изменять частоту вращения двигателя в широких пределах. Потери энергии при этом остаются незначительными, так как вследствие небольшой силы тока в обмотке возбуждения только немного энергии превращается в теплоту. Двигатели параллельного возбуждения широко применяются в устройствах, в которых необходимо автоматически регулировать частоту вращения.

Двигатель смешанного возбуждения является комбинацией двигателя последовательного и параллельного возбуждения. Его магнитное поле создается двумя обмотками. Одна соединена с якорем последовательно, другая — параллельно. Это дает возможность в известной мере комбинировать преимущества двигателей последовательного и параллельного возбуждения.

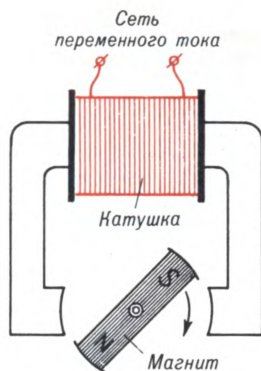
### **Двигатели переменного и трехфазного тока**

Если переключить зажимы у двигателя постоянного тока, то направление движения не меняется, так как меняется направление тока на обратное и в обмотке возбуждения, и в обмотке якоря. Поэтому двигатель постоянного тока может работать, если его подключить и к сети переменного тока.

Речь идет об *универсальном двигателе*, машине последовательного возбуждения, которая может работать и на переменном, и на постоянном токе. Используется она, конечно, только для небольших мощностей, например в бытовых приборах.

В отличие от обычного двигателя постоянного тока универсальный двигатель, конечно, имеет ряд особенностей. Якорь и статор состояются из отдельных, изолированных друг от друга пластин, чтобы снизить потери от вихревых токов. Мощность универсального двигателя выше при работе на постоянном токе, чем на переменном. Это объясняется тем, что при работе на переменном токе становится заметным индуктивное сопротивление обмоток. Чтобы поднять мощность этих двигателей до уровня работы на постоянном токе, двигатели снабжают часто дополнительной обмоткой. Ее

Рис. 99. Принцип действия синхронного двигателя



необходимо переключать при переходе с постоянного тока на переменный и обратно.

Очень несложен синхронный двигатель переменного тока (рис. 99).

Между наконечниками электромагнита, являющегося статором, обмотка которого подключается к сети переменного тока, помещается магнитный стержень — ротор. На концах наконечников возникают постоянно меняющиеся полюсы с частотой, соответствующей частоте переменного тока. После каждой полуволны северный и южный полюсы меняются местами. Если магнитный стержень (ротор) вращается так, что его северный полюс находится как раз против южного полюса статора и изменение направления тока происходит, когда магнитные полюсы статора и ротора находятся ближе всего друг к другу, то во время последующей полуволны переменного тока северный полюс ротора оттолкнется от этого полюса статора, так как теперь он тоже стал северным полюсом, и притянется к противоположному наконечнику статора. Если конец ротора подходит к наконечнику в момент нового изменения направления тока, то в процессе его движения опять происходит переход от притяжения к отталкиванию. Соответственно проходят процессы замены полюсов и на другом конце магнитного стержня.

А это означает, что если ротор попал "в такт" с переменным магнитным полем, то он будет непрерывно вращаться,

так как периодически получает все новые импульсы движения. Частота вращения его установилась и соответствует частоте переменного тока. Этим объясняется и его название — *синхронный двигатель*.

Если двигатель сильно перегрузить, так что частота вращения его заметно упадет, то роторные полюсы "отстанут" и у магнитных наконечников возникнут процессы, прямо противоположные желаемым. Двигатель "выпадает из темпа" и останавливается. Описанный однофазный синхронный двигатель (рис. 100) имеет еще следующий недостаток. Он не запускается, пока не достигнет номинальных оборотов. Только с помощью специальных приемов можно добиться самостоятельного запуска двигателя.

Синхронные двигатели применяются там, где необходимо точно выдерживать частоту вращения. Например, в электрических часах, электроприводе проигрывателя или магнитофона, в самопишущих приборах для различных измерений и т. д.

Принцип действия синхронного двигателя трехфазного переменного тока был рассмотрен на стр. 167 — это вращающаяся в бегущем магнитном поле магнитная стрелка. Вместо магнитной стрелки у трехфазного синхронного двигателя (рис. 101) находится электромагнит, который должен возбуждаться от источника постоянного тока. Хотя

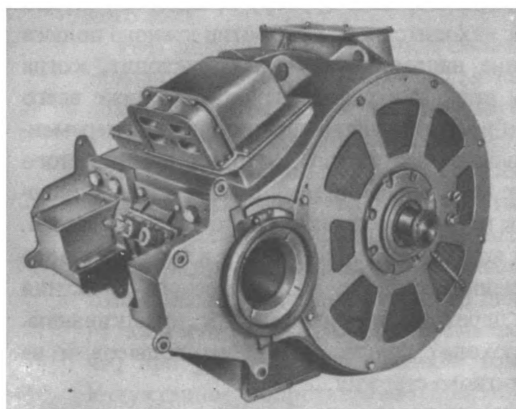


Рис. 100. Однофазный тяговый двигатель 730 кВт

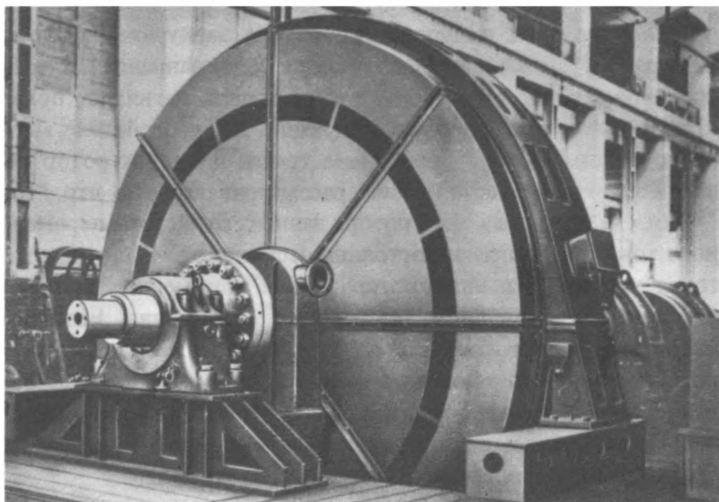


Рис. 101. Синхронный двигатель трехфазного переменного тока мощностью 5000 кВт

в большинстве случаев генератор возбуждения размещают на оси двигателя, необходимость в независимом возбуждении остается недостатком синхронного двигателя трехфазного тока. Кроме того, запуск двигателя осуществим только специальными приемами: частота его вращения должна доводиться извне до номинальной.

Несмотря на эти недостатки, синхронный двигатель переменного тока, по сравнению с асинхронным двигателем, имеет более высокие коэффициент мощности и перегрузочную способность. Кроме того, с помощью синхронного двигателя переменного тока можно улучшать показатель мощности энергетической сети. Если отрегулировать возбуждение ротора соответствующим образом, то ротор индуцирует в статоре двигателя такую большую противо-э.д.с., что двигатель начинает отдавать реактивный ток в сеть энергоснабжения.

Если удалить из синхронного двигателя переменного тока вращающийся магнит, чтобы поставить на его место способный к вращению металлический цилиндр или диск, то он тоже начнет вращаться. Такая установка является моделью *асинхронного двигателя* переменного тока.

Вращение его обусловлено следующим. Вращающееся поле переменного тока индуцирует в роторе электрический ток. По правилу Ленца этот ток должен быть направлен и действовать так, чтобы ослабить вращающееся магнитное поле, которое является причиной индукции. Взаимодействие магнитного поля с индуцированным током приводит ротор во вращение. Подобное явление рассматривалось на стр. 116.

Хотя частота вращения ротора зависит от частоты переменного тока, она, однако, постоянно несколько меньше частоты тока: частота вращения ротора более или менее "отстает" от частоты переменного тока. И это естественно. Если бы ротор вращался так же быстро, как вращающееся магнитное поле переменного тока, то это поле и ротор находились бы относительно друг друга в покое. В роторе бы тогда вообще не индуцировалась э.д.с. и, следовательно, исчез бы импульс вращательного движения.

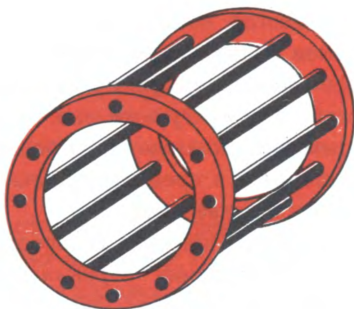
Отношение разности частот вращения поля и ротора к частоте вращения поля называют "скольжением". Оно составляет только небольшой процент от частоты вращающегося поля. Так как между частотой вращающегося поля и частотой вращения ротора нет постоянной связи, то такого рода двигатели называются *асинхронными двигателями*.

Особенно широкое применение находят асинхронные двигатели с *короткозамкнутой обмоткой ротора*. Цилиндрический ротор собирают из листов стали, которые изолируют друг от друга. В глубокие пазы, параллельные оси ротора, укладывают медные или алюминиевые стержни. На обоих концах стержни соединяют друг с другом вместе металлическими короткозамыкающими кольцами. Если мысленно отбросить сердечник ротора, то "обмотка" становится похожей на клетку, поэтому такой тип обмотки ротора называют беличьей клеткой (рис. 102).

Двигатель с короткозамкнутой обмоткой ротора особенно прост и безопасен. Поскольку он не имеет ни контактных колец, ни коллектора, то не существует опасности искрения. Поэтому он может использоваться во взрывоопасных установках и не дает радиопомех.

Так как частота вращения такого двигателя постоянна и вовсе незначительно изменяется при изменении нагрузки,

Рис. 102. Обмотка асинхронного двигателя типа беличьей клетки



то его широко используют в качестве электродвигателя для привода станков (рис. 103).

При запуске двигателя с короткозамкнутой обмоткой ротора в обмотках статора протекает вначале очень большой пусковой ток. Непосредственно после включения разница в частоте вращения вращающегося поля и ротора особенно велика. Вследствие этого в роторе индуцируется высокая э.д.с., которая вызывает сильный роторный ток. Соответствующая электрическая нагрузка возникает также в катушках статора, как в трансформаторе.

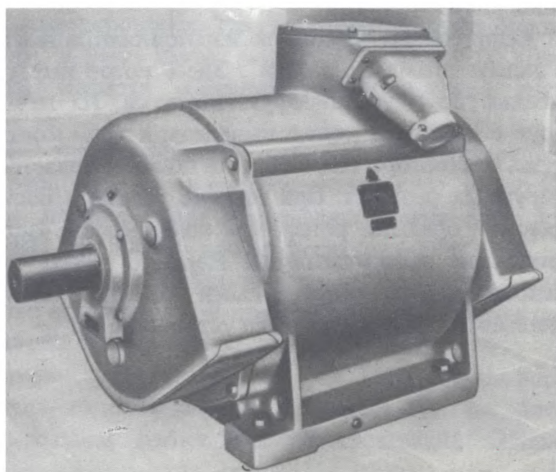


Рис. 103. Серийный двигатель трехфазного переменного тока типа АГЕ 112-4, 250 кВт, 1500 об/мин



Имеется много способов снижения высоких пусковых токов в двигателях с короткозамкнутыми обмотками роторов. Можно, например, включить между сетью и обмотками статора три регулируемых пусковых реостата, которые одновременно включаются на полное сопротивление и постепенно выводятся в процессе приближения частоты вращения двигателя к номинальной.

Другой, широко распространенный способ заключается в использовании *переключателя соединения обмоток со звезды на треугольник*. Это специальный переключатель, с помощью которого обмотки статора во время пуска сначала включаются на "звезду". Двигатель из-за этого получает вначале небольшое напряжение. При достижении известной частоты вращения обмотки переключаются на "треугольник" и на статор подается полное напряжение сети.

Также специальной конструкцией ротора добиваются, чтобы пусковой ток не достигал слишком высоких значений. У ротора с *ярко выраженным поверхностным эффектом*, например, протекающий ток при запуске двигателя встречает сначала более высокое сопротивление. Затем при работающем двигателе ток течет через детали ротора с меньшим сопротивлением.

Асинхронные двигатели изготавливаются и как "двигатели с контактными кольцами". Здесь ротор имеет три расположенные друг против друга обмотки. Их начала соединены друг с другом, а концы выведены к трем контактными кольцам. Ток ротора снимается щетками и подается на три регулируемых реостата. При запуске реостаты постепенно выводятся, и обмотки ротора при номинальной частоте вращения двигателя закорачиваются. Нередко ротор закорачивается непосредственно контактными кольцами с помощью специального закорачивающего устройства.

### Электростанция

Большинство электростанций в зависимости от источника энергии можно отнести к одной из двух групп: *тепловые электростанции*, использующие для получения тока энергию натурального топлива, и *гидроэлектростанции*, которые используют энергию текущей воды.

В мировом производстве электроэнергии тепловые станции держат первенство, далеко уйдя вперед. Тепловая энергия, высвобожденная при сжигании угля, нефти или газа, служит для получения пара высокой температуры и высокого давления. Он устремляется с большой скоростью на лопатки турбины, приводит ее в движение и наконец конденсируется в воду, которая вновь возвращается в парогенератор. Турбина же вращает генератор.

Тепловые электростанции стараются строить возможно большей мощности, так как они работают с лучшим к.п.д., чем менее мощные установки. Так, электростанции на буром угле в Люббенау и Вечау имеют мощность 1300 и 1200 МВт. Это мощность, которая соответствует физической силе 18 млн. человек!

На крупных электростанциях наблюдается дальнейшая тенденция к работе с паром все более высокого давления и температуры: давление пара современных электростанций составляет  $3 \cdot 10^7$  Па (300 ат) при температуре 600°C.

Мощность турбин и генераторов в последние десятилетия также постоянно повышается. В производстве уже находятся генераторы и турбины мощностью свыше 800 МВт\*.

Парогенераторы, турбогенераторы (рис. 108) и трансформаторы высоких напряжений изготавливаются сегодня, как правило, как готовые блоки для электростанций. Общая

---

\* У нас в стране для Костромской ГРЭС изготовлены машины по 1200 МВт каждая. (Прим. перев.)

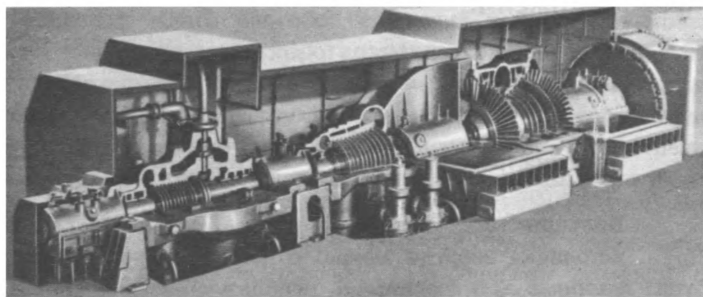


Рис. 104. Турбогенератор

компоновка электростанции и ее мощность определяется суммарной мощностью соответствующего числа таких единиц — блоков.

Вследствие многократных преобразований энергии к.п.д. самой современной электростанции остается относительно низким. Только незначительная часть связанной в топливе энергии возвращается в виде отдаваемой электрической энергии. "Удельное теплopotребление" в  $8,4 \cdot 10^6$  Дж (2000 ккал) на генерируемый киловатт-час является уже очень хорошим результатом, которого достигают далеко не все электростанции.

У так называемых *газотурбинных электростанций* отпадает промежуточная ступень — пар. Такие электростанции отличаются, помимо всего прочего, тем, что они могут запускаться за очень короткое время и сразу начинают подавать электроэнергию.

Работающие теперь *атомные электростанции* (АЭС) являются тепловыми станциями, котельная установка которых заменена атомным реактором. Их доля в мировом производстве электроэнергии пока еще мала. Все работающие ныне установки являются не только источниками энергии, но также и экспериментальными предприятиями, где накапливается опыт и готовятся специалисты.

Месторасположение тепловых электростанций определяется наличием топлива, его залежей. Эта привязка к месту еще более ярко выражена у гидроэлектростанций (ГЭС). Известно, что гидроэлектростанции реализуют незначительную часть водных запасов мира. Это, однако, связано не только

с местными условиями, а также и с тем, что в капиталистических странах не заинтересованы в сооружении ГЭС, поскольку достаточно натурального топлива и оно окупается с прибылью. Социалистические страны при сооружении ГЭС не руководствуются подобными соображениями.

Строительство гидроэлектростанций в Советском Союзе показывает, какие мощные энергетические ресурсы могут реализоваться в народном хозяйстве.

Мощность ГЭС зависит от того, какое количество воды протекает через турбину в секунду, и от высоты, с которой "падает" вода (роли не играет, что в большинстве случаев речь идет не о водопадах в буквальном смысле, а о реках). В природе, правда, по большей части встречаются либо большие количества воды (в реках), либо большой высоты водопады (в горной местности). В соответствии с этим различают виды станций: ГЭС с перепадом до 50 м называют *низконапорными*, ГЭС с перепадом более 50 м называют *высоконапорными*.

Для обеих категорий электростанций имеются специальные турбины, которые приводят в движение генераторы. В низконапорных установках вал турбины чаще всего располагают вертикально. Соответственно ему устанавливают и генератор. Такой генератор обычно имеет меньшую частоту вращения, чем турбогенератор, и оснащен ротором большого диаметра.

Низконапорные ГЭС сооружаются, как правило, на реках. Вода падает с плотины на лопасти турбины. Очень часто перепад составляет только несколько метров, когда не хотят затоплять большие пространства местности. При этом во многих случаях ведется обширное дополнительное строительство, чтобы не препятствовать судоходству.

Высоконапорные электростанции располагаются у основания высокой стены плотины — у тела плотины. Выгораживается часть берега или узкая полоска дна реки. Образуется водохранилище, которое почти всегда служит одновременно другим целям (например, водоснабжению, защите от наводнения и т.д.).

Мировой известностью пользуются гигантские высоконапорные ГЭС, которые построены в Сибири. Самая большая в мире Саяно-Шушенская ГЭС мощностью свыше 6000 МВт,

с плотиной высотой двести метров создается также в Сибири.

На протяжении всей истории развития человечество стремилось открыть новые методы получения энергии. Особенно острой эта проблема стала сейчас. Так, можно отметить десятилетние опыты по непосредственному превращению солнечной энергии в электрическую. *Солнечные батареи*, работа которых основана на открытиях физики полупроводников, дали этим опытам новое направление. Эти батареи уже сейчас имеют решающее значение для получения тока на спутниках связи и космических зондах. "На земле" они используются для получения небольших количеств энергии. Однако сегодня еще нельзя утверждать, будет ли превращение солнечной энергии в электрическую в ближайшее время играть существенную роль в получении энергии.

Опыты по использованию энергии ветра пока ограничены небольшими установками в районах с устойчивым ветровым режимом. Зато уже осуществлены отдельные проекты по использованию энергии приливов и отливов для получения электроэнергии. Во Франции в 1967 г. введена в строй первая большая мощная *приливная ГЭС* с 24 турбинами; опытная установка создана и в Советском Союзе. Такие установки целесообразны только там, где наблюдается большая разность в высоте прилива и отлива.

Совсем не тронуты до сегодняшнего дня мощные запасы теплоты внутри Земли. Советские ученые утверждают, что их использование со временем станет возможным в большом объеме.

Известно, что современные основанные на ядерном расщеплении атомные электростанции (АЭС) представляют собой переходное решение, хотя и очень важное. Будущее принадлежит, по всей вероятности, электростанциям, в которых электроэнергия будет получаться при использовании реакции синтеза (слияния) легких атомных ядер в более тяжелые. Такие электростанции смогут применять в качестве "топлива" воду. Они не будут иметь радиоактивных отходов, ликвидация которых представляет известные трудности. В настоящее время, однако, реакция синтеза для получения энергии еще технически неосуществима. Но уже намечается путь, как эту проблему можно решить.

Наряду с этим стараются открыть другие методы получения электроэнергии. Так, например, в *магнетогидродинамическом генераторе* (МГД-генераторе) с помощью магнитного поля "делят" электроны и положительные ионы, находящиеся в раскаленной плазме, и используют этот эффект для создания электрического напряжения. В топливном же элементе, наоборот, процессы окисления являются источником энергии.

### **Передача электрической энергии на дальние расстояния**

Как уже отмечалось выше, важнейшим преимуществом электроэнергии является то, что она может передаваться на большие расстояния и делиться чуть ли не на любые количества. Такая дальняя передача невозможна ни для какого другого вида энергии. Поэтому сразу после изобретения генератора занялись передачей электрической энергии на большие расстояния.

После многочисленных опытов по передаче электроэнергии мировую известность приобрела *передача из Лауффене*. По случаю Франкфуртской интернациональной выставки 1891 г. в Лауффене на реке Некар, находящемся примерно в 175 км от Франкфурта-на-Майне, были оборудованы гидротурбина и трехфазный генератор. Генератор вырабатывал ток напряжением 50 В. Ток трансформировался в Лауффене до напряжения 14 000 В и передавался во Франкфурт по медным проводам диаметром 4 мм. На территории выставки это напряжение понижалось трансформаторами и питало многочисленные лампы накаливания и двигатели, которые приводили в движение насос для искусственного водопада.

Сегодня неспециалистами задается вопрос: почему дальние передачи должны осуществляться при таком высоком напряжении, которое требует многочисленных мер безопасности и дорогостоящей изоляции?

Ответ дает основной закон учения об электричестве. Чтобы передать на расстояние определенную энергию, теоретически можно использовать низкое напряжение при большой силе тока или высокое напряжение при малой силе тока.

Предпочтение линиям высокого напряжения объясняется стремлением снизить потери, которые проявляются при передаче тока. При прохождении тока провода нагреваются. Преобразованная в теплоту мощность (см. стр. 28) при этом

$$P_{\pi} = I^2 R.$$

Потери мощности растут пропорционально квадрату силы тока. При сильных токах они возрастают настолько, что польза от передачи становится ничтожной.

**Пример.** Необходимо передать однофазный переменный ток мощностью 50 кВт на расстояние 200 км. Для линии используется алюминиевый провод сечением 25 мм<sup>2</sup>. Как велики потери в линии при разных напряжении и силе тока?

Сначала необходимо рассчитать сопротивление линии передачи (см. стр. 15):

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

Если подставить численные значения (учитывая линии туда и обратно), то получим:

$$R = \frac{0,0286 \cdot 400\,000}{25} = 457 \text{ Ом}.$$

Если пренебречь сдвигом фаз и выбрать сначала напряжение передачи 5000 В (такое напряжение непосредственно вырабатывает генератор), то из уравнения  $P = UI$  получим ток  $I = 10$  А. Потери мощности в линии при этих параметрах составят:

$$P_{\pi} = I^2 R = 100 \cdot 457 = 45\,700 \text{ Вт} = 45,7 \text{ кВт}.$$

Почти вся передаваемая мощность (50 кВт) расходуется на преодоление сопротивления линии передачи. Если повысить напряжение передачи до 100 кВ, тогда сила тока в линии составит только 0,5 А и потери будут

$$P_{\pi} = I^2 R = 0,25 \cdot 457 = 114 \text{ Вт} \approx 0,1 \text{ кВт}.$$

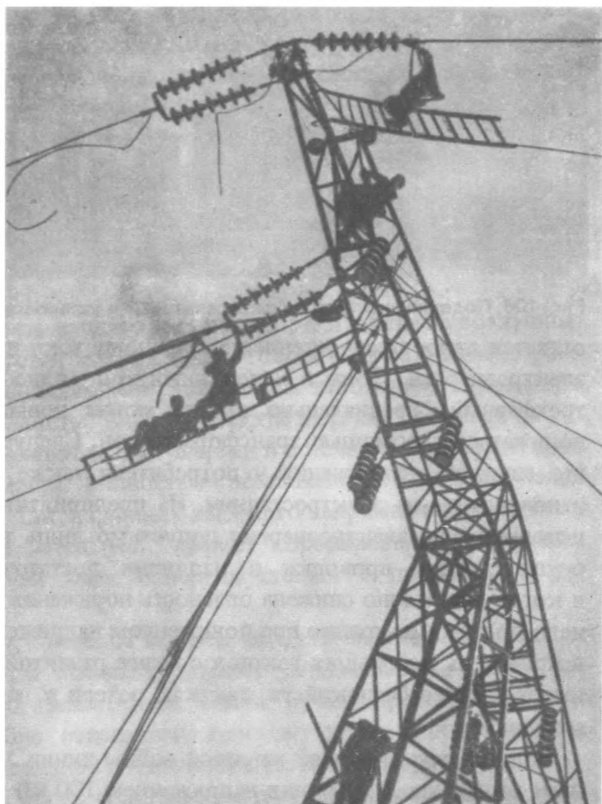


Рис. 105. Линия электропередачи высокого напряжения

Следовательно, повышение напряжения передачи решающим образом может снижать потери мощности в линии.

Другой путь снижения потерь заключается в уменьшении сопротивления линии передачи. Этого можно достичь увеличением сечения проводов. Однако уже простые расчеты показывают, что для передачи больших количеств энергии были бы необходимы такие сечения проводов, что технически передача энергии оказалась бы неосуществимой.

Поэтому для дальних линий электропередачи (рис. 105) с давних пор действует закон: наивысшее возможное напряжение, но наинизшая сила тока. Благодаря этому закону



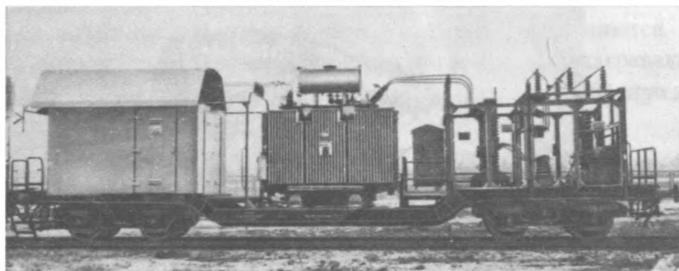


Рис. 106. Подвижная электrorаспределительная установка

отдается явное предпочтение переменному току при передаче электроэнергии. Только переменный ток (однофазный или трехфазный) сравнительно просто может повышаться или понижаться с помощью трансформаторов. Следует отметить, что снижение напряжения у потребителя также важно, как и повышение на электростанции. На предприятиях и в быту использование электроэнергии допустимо лишь тогда, когда осуществление проводки и изоляции достаточно дешево и когда достаточно снижена опасность поражения током. Эти цели достижимы только при пониженном напряжении, причем потребитель небольших токов и с менее развитой проводкой имеет меньше беспокойств, так как потери у него остаются меньшими.

Еще до начала первой мировой войны линии электропередачи на дальние расстояния напряжением 100 кВ уже находились в эксплуатации. В 20-х годах нашего столетия напряжения перешли уже за 220 кВ. Линии такого напряжения еще и сейчас широко распространены. Новые линии электропередачи (также и в ГДР) строятся для более высоких напряжений. Широко распространены линии электропередачи напряжением 380 кВ, а для передачи на очень большие расстояния, как это имеет место в Советском Союзе, переходят на линии напряжением 525 кВ и выше.

Понижение напряжения осуществляют не за один прием, а ступенчато. Так, часто ток высокого напряжения сначала трансформируют в ток напряжением 110 кВ (рис. 106). Это напряжение служит для энергоснабжения областей. В сетях регионов напряжение снижается до нескольких киловольт, а в непосредственной близости от потребителей с помощью

многочисленных местных трансформаторов получают обычное для нас напряжение 220/380 В.

Передачу энергии на дальние расстояния осуществляют воздушными линиями или кабелем. В "свободных", незастроенных местностях используют воздушные линии. Чтобы сэкономить дефицитную медь, в качестве материала для провода используют алюминий. Так как алюминий обладает меньшей прочностью, чем медь, обычно используют алюминиевый трос со стальным сердечником — сталеалюминиевый провод.

Огромность изоляторов, которые мы видим на воздушных линиях высокого напряжения, говорит о том, какие дорогостоящие изоляционные устройства необходимо применять, чтобы уменьшить "утечку" электроэнергии. Несмотря на это, все-таки имеются потери энергии и источники опасности, которые не могут полностью исключаться соответствующей изоляцией. Так, на линиях высокого напряжения проявляется крайне нежелательный "эффект коронирования" — процесс, при котором электроэнергия стекает с проводника (см. стр. 67).

Снижают потери от короны тем, что вместо одного сплошного провода используют много параллельных, близко расположенных проводников. Такие "пучки" проводников ведут себя подобно отдельному толстому проводнику с незначительной кривизной поверхности. Потери на корону падают.

Мачты и провода линии электропередачи особенно молниеподобны. В настоящее время разработано много молниезащитных устройств: молниеотводы, грозозащитные тросы, разрядники и др.

Трехфазный (как и однофазный) ток может передаваться на большие расстояния, хотя и не на любые по дальности. При расстояниях 800 км и более возникает проблема устойчивости передачи. С увеличением длины линий самоиндукция и емкость сооружений передачи весьма заметно дают о себе знать.

Эти трудности могут быть устранены, если вместо трехфазного переменного тока передачу энергии осуществлять постоянным током высокого напряжения. Поэтому уже более двадцати лет обсуждаются и апробируются передачи *сверхвысокого напряжения постоянного тока*.

Линии электропередачи сверхвысокого напряжения постоянного тока не предназначены для целей, которые уже решены современной техникой переменного тока. По-прежнему электростанции вырабатывают переменный ток и он подается к месту потребления. Только для передачи на дальние расстояния выработанный переменный ток преобразуется в постоянный. Для этого в начале линии необходимо оборудовать выпрямительную подстанцию, а в конце линии передачи — инверторную подстанцию, преобразующую "выпрямленный" постоянный ток в переменный трехфазный ток. Эти устройства очень дороги и в настоящее время еще не вполне удовлетворительны по техническому решению. Во многих странах, например в Советском Союзе, уже имеются в эксплуатации линии электропередачи сверхвысокого напряжения постоянного тока\*. Они служат и для накопления опыта передачи энергии этим способом. Можно напомнить, что к сороковым годам была построена и в Германии опытная линия электропередачи сверхвысокого напряжения постоянного тока. Она, однако, недолго находилась в эксплуатации из-за начавшейся второй мировой войны.

### Энергетические системы

В общественном энергоснабжении редко случается так, чтобы электростанция располагала "собственной" сетью распределения энергии и снабжала бы электроэнергией только "своего" потребителя тока. В подавляющем большинстве случаев энергия многих электростанций "снабжает" общие распределительные сети. Называют их *энергосистемой*. Потребитель тока вообще не знает, какая электростанция снабжает его энергией: "ток ли из ГДР", "чешский" или "польский ток" питает наши лампы и заставляет звучать наши радиоприемники.

Энергосистема имеет неоценимое преимущество в энергоснабжении. Если бы электростанция снабжала током только

---

\* В текущей пятилетке вводится в строй линия передачи постоянного тока Экибастуз—Центр напряжением 1500 кВ, в будущем планируется линия электропередачи свыше 2000 кВ. (Прим. перев.)

одного своего потребителя, то каждая авария (выход из строя турбины, генератора или трансформатора и т.д.) сказывалась бы на потребителе. Он лишался бы электроэнергии на все время аварии. Хотя такие отказы можно было бы скомпенсировать достаточно большим количеством резервного оборудования на электростанции, однако это было бы неэкономично. При таком положении, поскольку аварии происходят сравнительно редко, резервное оборудование, как правило, оставалось бы неиспользованным.

При наличии же энергосистемы можно "резервирование" ограничить до минимума, так как маловероятно, чтобы много электростанций или агрегатов одновременно вышли из строя.

Аварии являются чрезвычайным случаем. Однако и при нормальной эксплуатации объединенные энергосистемы оказываются полезными. Производство электроэнергии, например, гидроэлектростанциями зависит от имеющегося количества воды. В разгар лета и во время длительных морозов наблюдается недостаток воды. Во время же таяния снегов и затяжных дождей, наоборот, ГЭС располагают количеством воды, которое полностью не могут использовать. В энергосистеме можно так регулировать производство энергии гидро- и теплоэлектростанциями, чтобы электроэнергия вырабатывалась наиболее экономично.

Потребность в электроэнергии в течение года и в течение суток меняется. Естественно, что зимой потребность в энергии выше, чем летом. Зимой много больше тока идет на освещение, в холодное время года больше тока расходуется на электронагрев.

Еще понятнее, чем по временам года, колебания в потреблении электроэнергии в течение суток. Здесь прослеживаются два ярко выраженных *максимума нагрузки* — утренний и вечерний. Они возникают из-за того, что в это время предприятия, хозяйства и местный транспорт потребляют больше тока, чем в остальные часы суток. Особенно заметно падает потребление энергии ночью.

Если бы электростанции вырабатывали энергию только для "своих" потребителей, то каждая станция должна была бы быть столь мощна, чтобы перекрывать любой максимум нагрузки. Это потребовало бы, с одной стороны, очень больших

капиталовложений и потому было бы неэкономично, а с другой стороны, в течение многих часов мощность станции не использовалась бы.

Совсем другая ситуация в энергосистеме. Здесь *основную нагрузку* (так называют постоянно потребный уровень энергии) покрывают электростанции, которые не могут быстро регулироваться. Это относится, например, к тепловым электростанциям, которым требуется много часов, чтобы начать поставлять энергию потребителям. Кроме того, можно использовать для покрытия основной нагрузки станции, которые работают с наилучшим к.п.д.

Для покрытия максимумов нагрузок служат электростанции, которые могут "разгоняться" за короткое время. Это прежде всего гидроэлектростанции, которые "консервируют" запасы энергии в виде отведенных от основного русла запасов воды в часы малой нагрузки. Приплотинные электростанции особенно пригодны для выравнивания максимумов нагрузок. Кроме того, имеются специальные пиковые электростанции, которые должны включаться в энергосистему при максимальных нагрузках и которые конструируются как тепловые электростанции. Особенно часто используются газотурбинные установки, которые очень быстро запускаются и так же быстро останавливаются. Большое количество таких газотурбинных электростанций создано в ГДР.

Покрытию максимальных нагрузок служат также *гидроаккумулирующие насосные электростанции* (рис. 107). Насосная гидроаккумулирующая электростанция попеременно вырабатывает и потребляет электроэнергию. Во время минимума нагрузки, следовательно преимущественно в ночные часы, она принимает избыточную энергию других электростанций и перекачивает воду в высоко расположенное водохранилище. Во время повышенного потребления энергии, т.е. во время "пика", вода сбрасывается с высоты. Вращаются турбины и генераторы, "пиковый ток" поступает в сеть электроснабжения.

В ГДР имеется много работающих гидроаккумулирующих электростанций. Водохранилища станции в Ниедерварте, например, могут выдать так много воды, что в период максимума нагрузки вырабатывают здесь до 560 000 кВт·ч

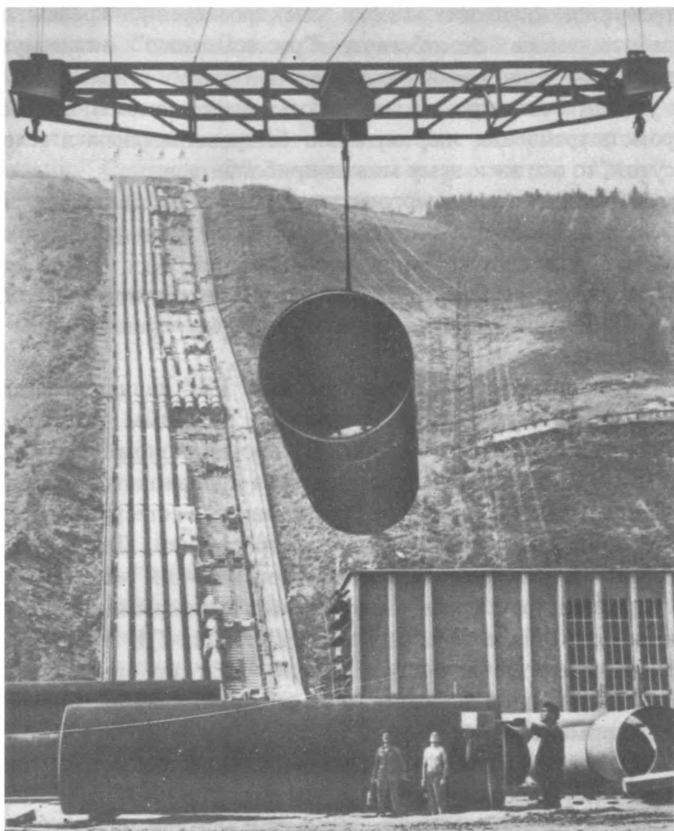


Рис. 107. Строительство гидроаккумулирующей станции

электроэнергии. Водохранилища аккумулирующей электростанции в Хоснварте II вмещают столько воды, что обеспечивают выработку 2 000 000 кВт·ч. Аккумулирующие станции могут включаться в течение нескольких минут.

Однако покрытие максимума нагрузки может осуществляться не только пополнением энергии со стороны. Потребители энергии и их "энергетическая дисциплина" играют здесь решающую роль. Во время максимумов нагрузок хозяйства должны сокращать потребление энергии до меры крайней необходимости. На предприятиях необходимо переносить на ночные часы технологические процессы, при которых

требуется особенно много электроэнергии. Трехсменная работа также способствует "рассасыванию" максимумов нагрузок. Если всеми этими мероприятиями и нельзя достигнуть оптимального режима работы энергосистемы, при котором потребление энергии было бы равномерным в течение суток, то все же к нему можно приблизиться.

Объединенные энергосистемы тем эффективнее, чем большее пространство они охватывают. Малые страны не имеют для систем таких возможностей, как государства, располагающие большими территориями. Поэтому все больше и больше укореняется энергообмен через границы государств.

Проиллюстрируем это примерами. ГДР является страной, энергоснабжение которой основано главным образом на тепловых электростанциях. В противоположность этому в ЧССР большая часть электричества производится из водной энергии, так как имеются благоприятные естественные условия для сооружения гидроэлектростанций. Так как обе страны обмениваются электроэнергией, то чехословацкие гидроэлектростанции могут помочь перекрыть максимумы нагрузок ГДР, а тепловые электростанции ГДР — передавать электроэнергию в дружественную ЧССР во время падения мощности на их станциях. Обе страны имеют выгоду от такого обмена.

Обмен энергией в больших масштабах решает проблему покрытия максимумов нагрузок всесторонне. Если энергосистема распространяется далеко с Запада на Восток, то в отдельных регионах этой системы максимумы нагрузки наступают в разное время, так как восход и заход солнца в них не совпадает. В то время как в западных районах такой системы, например, наступает вечерний максимум нагрузки, в восточных районах уже наступила ночь и потребление энергии соответственно снизилось. Поэтому можно из восточных районов передавать ток в западные, чтобы выравнять вечерний максимум нагрузки. В ранние утренние часы соотношение меняется. В то время как на Западе системе требуется еще мало энергии, на Востоке уже наблюдается утренний максимум нагрузки и энергия течет теперь "в уплату" с Запада на Восток.

Таковыми соображениями, как и многими другими, руководствовались страны Совета Экономической Взаимопомощи (СЭВ), когда создавали единую интернациональную энергосистему. Большая часть этой системы, которая контролируется и управляется из единого центра, уже находится в эксплуатации. Сегодня Объединенная энергосистема "Мир" является одной из самых мощных энергосистем в мире и ярко подтверждает слова В.И.Ленина:

"Коммунизм — это есть Советская власть  
плюс электрификация всей страны".

## ПРИЛОЖЕНИЕ




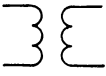



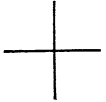





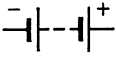

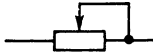
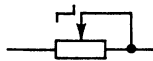
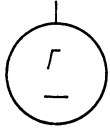

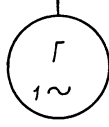
Если хотят графически изобразить какой-либо электро-технический прибор или прибор электроники и связи так, чтобы все элементы его находились в правильной последовательности и истинном масштабе, показать все соединения в их действительной связи, то в большинстве случаев необходимы многочисленные и труднообозримые рисунки. Было бы очень сложно изучить отдельные контуры тока и взаимосвязь элементов и блоков.

Поэтому ввели (подобно тому, как это давно сделано в математике и химии) ряд символов, условных обозначений электрических схем, с помощью которых любой техник относительно просто и очень наглядно может изобразить схему сложного устройства.

Условные обозначения электрических схем выдержаны так, чтобы выступал наиболее характерный признак элемента или блока, который он представляет. Так, символом ключа является рычаг переключателя, символом триода — три электрода, символом трансформатора — обмотка.

Отдельные схемные обозначения приведены ниже. Они должны помочь читателю при чтении этой книги и при изучении специальной литературы.



	постоянный ток		катушка индуктивности с ферромагнитным сердечником
	переменный ток (частота может указываться числом позади знака, количество фаз — числом перед знаком)		трансформатор
			трансформатор с ферромагнитным сердечником
	проводник		конденсатор
	пересечение проводников без соединения		конденсатор переменной емкости
	пересечение проводников с соединением		элемент гальванический или аккумуляторный
	заземление		
	соединение с корпусом		батарея из гальванических или аккумуляторных элементов
	резистор		
	резистор регулируемый		
	резистор со ступенчатым регулированием		генератор постоянного тока
	катушка индуктивности		генератор однофазного переменного тока

	генератор трехфазного тока
	двигатель по- стоянного тока
	двигатель однофазного переменного тока
	двигатель трехфазного тока
	предохранитель
	измерительный прибор без ука- зания измеряе- мой величины
	измеритель напряжения (вольтметр)
	измеритель силы тока (амперметр)
	выключатель однополюсный
	реле электро- механическое
	звонок
	лампа накали- вания, световой сигнализатор

	микрофон
	телефон
	громкоговори- тель
	диод электро- вакуумный прямого накала
	диод электро- вакуумный косвенного накала
	диод электро- вакуумный с общим обо- значением ка- тода
	триод электро- вакуумный
	пентод элек- тروвакуумный
	тиратрон газо- разрядный
	диод полупро- водниковый
	триод полупро- водниковый типа <i>p-n-p</i>

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	5
<b>Электрический контур . . . . .</b>	<b>6</b>
Что такое электрический ток? . . . . .	—
Важнейшая категория — сила тока . . . . .	9
Напряжение — причина электрического тока . . . . .	10
Сопротивление “тормозит” ток . . . . .	14
Закон Ома связывает основные величины . . . . .	17
Электродвижущая сила (э.д.с.) и напряжение на зажимах . . . . .	23
<b>Работа, мощность, электронагрев . . . . .</b>	<b>26</b>
Киловатт и киловатт-час . . . . .	—
Теплота от электричества . . . . .	31
Электроэнергия в быту . . . . .	34
Электронагрев в промышленности . . . . .	38
Лампа накаливания . . . . .	41
<b>Химическое действие электрического тока . . . . .</b>	<b>43</b>
Диссоциация и электролиз . . . . .	—
Применение электролиза . . . . .	47
Химические источники тока . . . . .	53
Аккумуляторы . . . . .	56
<b>Статическое электричество . . . . .</b>	<b>58</b>
Взаимодействие зарядов . . . . .	—
Применение электростатических явлений . . . . .	61
Электрическое поле . . . . .	63
Конденсатор . . . . .	70
<b>Магнитные свойства электрического тока . . . . .</b>	<b>74</b>
Магнит и магнитное поле . . . . .	—
Магнитное поле электрического тока . . . . .	77
Магнитные материалы . . . . .	81

Электромагнитные явления в технике . . . . .	86
Телеграф и телефон . . . . .	91
Взаимодействие магнитных полей . . . . .	97
<b>Явление индукции . . . . .</b>	<b>106</b>
Получение тока методом индукции . . . . .	—
Применение явлений индукции . . . . .	110
Вихревые токи . . . . .	114
Самоиндукция . . . . .	116
<b>Электрический ток в вакууме, газах и полупроводниках . . . . .</b>	<b>119</b>
Термоэлектронная эмиссия . . . . .	—
Электроны на заданных траекториях . . . . .	122
Усилители электрических колебаний . . . . .	129
Явление разряда в газах . . . . .	132
Полупроводниковые элементы . . . . .	137
<b>Переменный ток . . . . .</b>	<b>148</b>
Получение и характеристики . . . . .	—
Индуктивность и емкость в цепи . . . . .	151
Мощность, коэффициент мощности и работа . . . . .	157
Трехфазный ток — вращающий ток . . . . .	162
<b>Генераторы — трансформаторы — двигатели . . . . .</b>	<b>168</b>
Генераторы переменного и постоянного тока . . . . .	—
Трансформаторы . . . . .	173
Двигатели постоянного тока . . . . .	178
Двигатели переменного и трехфазного тока . . . . .	182
<b>Энергоснабжение . . . . .</b>	<b>189</b>
Электростанция . . . . .	—
Передача электрической энергии на дальние расстояния . . . . .	193
Энергетические системы . . . . .	198
<b>Приложение . . . . .</b>	<b>204</b>

Вальтер Конрад

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА  
КРАТКО И НАГЛЯДНО**

Редактор **В.Н.Миханкова**

Художественный редактор **Д.Р.Стеванович**

Технический редактор **А.Г.Рябкина**

Корректор **С.С.Полигнотова**

Обложка художника **Ю.И.Прошлецова**

**ИБ № 2104**

Подписано в печать 25.01.80 (набор выполнен в издательстве). М-32536. Формат 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага офсетная № 2. Офсетная печать. Усл. печ. л.10,92. Уч.-изд. л. 9,88. Тираж 40 000 экз. Заказ 5052. Цена 75 к.

Ленинградское отделение издательства "Энергия".  
191041, Ленинград, Д-41, Марсово поле, 1.

Ленинградская фабрика офсетной печати № 1 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 197101, Ленинград, ул. Мира, 3.

