

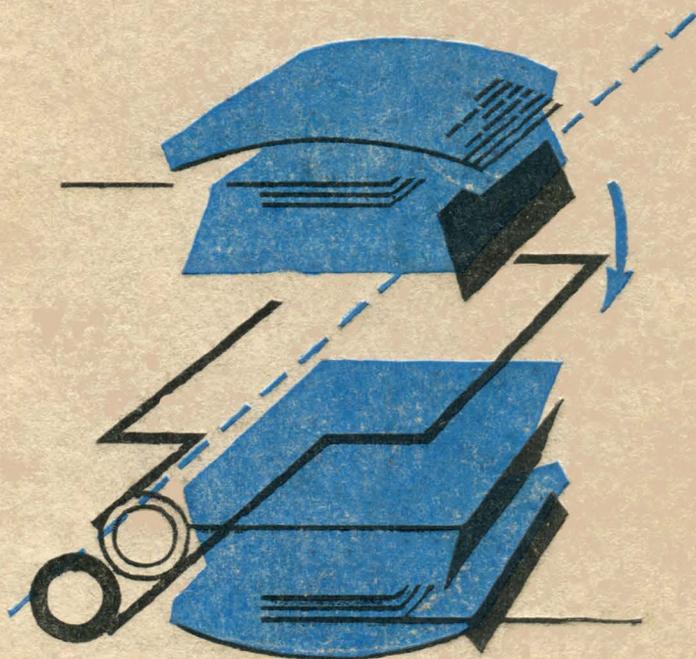
ПРОФТЕХОБРАЗОВАНИЕ



ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

В. Е. КИТАЕВ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА С ОСНОВАМИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ



ЭЛЕКТРОТЕХНИКА С ОСНОВАМИ
ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

В. Е. КИТАЕВ

В. Е. КИТАЕВ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА С ОСНОВАМИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Одобрено Ученым советом
Государственного комитета СССР
по профессионально-техническому
образованию
в качестве учебного пособия
для профессионально-технических
училищ



Москва «Высшая школа» 1980

ББК 31.2
К 45
УДК 621.3

ВСЕ ЗАМЕЧАНИЯ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПРОСИМ НАПРАВЛЯТЬ ПО АДРЕСУ: МОСКВА, К-51, НЕГЛИННАЯ УЛ., 29/14, ИЗДАТЕЛЬСТВО «ВЫСШАЯ ШКОЛА».

Китаев В. Е.

К 45 ^е Электротехника с основами промышленной электроники. Учеб. пособие для проф.-техн. училищ.— М.: Высш. школа, 1980.— 254 с., ил.— (Профтехобразование. Электротехника).
В пер.: 55 к.

В учебном пособии содержатся сведения по теории электротехники, приведены методы расчета электрических цепей, рассмотрено устройство и принцип действия химических источников тока, электронизмерительных приборов, трансформаторов, электрических машин переменного и постоянного тока.

Даны основы электроники, описана конструкция и работа электронных ламп, полупроводников, ионных приборов и фотоэлементов, приведены основные устройства промышленной электроники: выпрямители, усилители, генераторы, реле.

К $\frac{30306-224}{052(01)-80}$ 37-80 2302010000 БП2.1
ББК 31.2

ПРЕДИСЛОВИЕ

Электротехника в широком понимании это наука, изучающая способы использования электрических и магнитных явлений для практических целей. Электротехника охватывает большой комплекс вопросов и разделена на ряд областей.

Одной из важнейших областей электротехники является электроэнергетика, которая рассматривает вопросы производства электрической энергии (из других видов энергии), передачи энергии на дальние расстояния, распределение ее между потребителями и преобразование электрической энергии в другие виды энергии — механическую, тепловую, химическую и т. д.

Народное хозяйство СССР развивается высокими и устойчивыми темпами. В 1980 г. производство электроэнергии увеличилось до 1340—1380 млрд. кВт·ч, освоено производство турбогенераторов мощностью 1000—1200 тыс. кВт для тепловых и атомных электростанций, генераторов мощностью 640 тыс. кВт для гидроэлектростанций. Продолжаются работы по формированию Единой энергетической системы страны путем объединения энергосистем Сибири и Средней Азии с Европейской энергосистемой, сооружаются магистральные линии электропередачи напряжением 500, 750 и 1150 тыс. В.

На основе электрификации все шире внедряется комплексная механизация и автоматизация производственных процессов. Интенсивно развивается электротехнология — электротермические и электролитические способы получения и обработки металлов. С каждым годом вступают в строй новые автоматические линии машин, цехи и заводы-автоматы. Электроэнергия используется для электросварки, закалки стали токами высокой частоты, сушки древесины и т. д.

Электроника является областью электротехники, которая зародилась сравнительно недавно — несколько десятилетий назад. Она рассматривает движение заряженных частиц в вакууме, в газовой среде или твердом теле и управление этим движением с целью различного рода преобразований электрических величин или одного вида энергии в другой. Электроника охватывает вопросы производства и применения электронных приборов: электровакуумных ламп, полупроводниковых и ионных приборов, фотоэлементов, солнечных батарей и других устройств, выполняющих функции преобразования энергии, управления отдельными механизмами, станками, поточными линиями, а также контроль за ними.

Практически нет отрасли народного хозяйства или области науки, где не использовались бы новейшие достижения электроники и не

применялись бы в большом количестве электронные приборы. Электроника проникает во все отрасли народного хозяйства и науки, оказывая революционизирующее влияние на их развитие. Современная электроника позволяет создавать миниатюрные устройства для вычислительных машин, различных автоматов и управления производственными процессами.

В настоящее время — время накопления, передачи, приема и обработки огромных объемов информации роль электронных приборов все более возрастает. Быстрое развитие электронной вычислительной техники позволяет совершенствовать работу систем автоматического управления и решать экономические задачи важного народнохозяйственного значения. Электротехнические устройства получения, переработки, передачи и отображения информации являются важнейшими элементами технических средств автоматизированных систем управления (АСУ).

Обширное применение электротехники во всех отраслях народного хозяйства и все большее внедрение электроники в промышленность настоятельно требуют знания молодыми рабочими основных вопросов электротехники и электроники.

Глава I

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОСТАТИКИ

§ 1. Понятие о строении вещества

Каждое вещество состоит из мельчайших частиц — молекул, а молекулы — из атомов. Простые вещества (медь, алюминий и т. д.) содержат молекулы, образованные из одинаковых атомов данного вещества. Молекулы же сложных веществ состоят из атомов различных химических элементов. Например, в состав молекулы воды входят два атома водорода и один атом кислорода.

Каждый атом представляет собой ядро, состоящее из протонов и нейтронов и обращающихся вокруг него электронов. Ядро атома имеет положительный заряд и занимает ничтожно малую часть объема атома. Положительный заряд атома обусловлен наличием в нем протонов. Нейтрон, обладая массой, несколько большей массы протона, не имеет никакого заряда, т. е. он электрически нейтрален. Электроны являются носителями отрицательных зарядов. Масса электрона примерно в 1840 раз меньше массы протона. Число протонов в ядре равно числу электронов, окружающих ядро, и атом в целом нейтрален, т. е. не имеет электрического заряда. На рис. 1 изображена схема строения атома водорода, ядро которого содержит один протон и один нейтрон, а вокруг ядра движется один электрон.

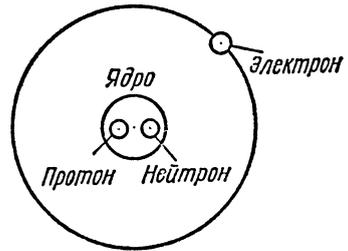


Рис. 1. Схема строения атома водорода

Число протонов в ядре равно атомному номеру элемента в периодической системе Д. И. Менделеева. Сумму числа протонов Z и числа нейтронов N называют массовым числом: $A = Z + N$.

Химические элементы, ядра которых содержат одинаковое число протонов, но различное число нейтронов, называются изотопами.

В каждом атоме любого химического элемента число электронов и протонов одинаково, так что общий отрицательный заряд электронов атома равен положительному заряду протонов, содержащихся в ядре. Равные по величине положительные и отрицательные заряды по отношению к внешней среде уравниваются, взаимно нейтрализуются, в результате чего атомы вещества в обычном состоянии электрически нейтральны. Если же от атома вещества отщепляется один или несколько электронов, то атом превращается в положительно заряженный ион. В случае, когда атом вещества воспринимает лишние электроны, то он ионизируется отрицательно, превращаясь в отрицатель-

ный ион. Электроны движутся вокруг ядра и находятся от него на различных расстояниях, поэтому взаимодействие положительных зарядов протонов ядра с электронами неодинаково; оно ослабляется по мере удаления электрона от ядра. Таким образом может меняться число электронов, наиболее удаленных от ядра и наиболее слабо связанных с ядром.

Число электронов, на которое может ионизироваться атом (увеличением числа электронов при отрицательной ионизации и уменьшением их числа при положительной ионизации), равно валентности атома, определяемой числом наиболее удаленных электронов в нейтральном состоянии атома.

Число электронов в атомах различных твердых материалов (наэлектризовать тела) можно изменить трением, нагреванием, индукцией, воздействием химических реакций, световой энергии, механической деформацией и другими способами.

Еще в 1888 г. профессор А. Г. Столетов установил, что под действием света из таких материалов, как цинк, алюминий, цезий, натрий, свинец, калий и т. п., вылетают электроны и эти материалы заряжаются положительным электричеством. На этом явлении, называемом фотоеффектом, основан принцип работы фотоэлементов.

При нагревании металлов до определенной температуры скорости движения наиболее слабо связанных с ядром электронов достигают таких величин, что их кинетическая энергия оказывается достаточной, чтобы оторвать электроны от ядра. В результате электроны становятся свободными носителями отрицательных зарядов, а атомы металла, потерявшие электроны, приобретают положительные заряды. Это явление называется термоэлектронной эмиссией и используется в электронных лампах.

В химических источниках электрической энергии положительные и отрицательные полюсы образуются в результате переноса зарядов при химических реакциях.

При механической деформации (сжатии, растяжении и т. д.) на поверхности некоторых кристаллических тел (например, кварца, турмалина, сегнетовой соли) возникают электрические заряды. Это явление называется прямым пьезоэлектрическим эффектом. При обратном пьезоэлектрическом эффекте кристалл деформируется под действием электрических зарядов. Пьезоэлектричество находит широкое применение в радиотехнике.

§ 2. Электрическое поле. Закон Кулона

Электрические заряды взаимодействуют между собой так, что разноименно заряженные тела притягиваются друг к другу, одноименно заряженные отталкиваются. Каждый заряд создает в окружающем его пространстве электрическое поле, так что взаимодействие заряженных тел происходит при посредстве электрического поля.

Электрическим полем называется материальная среда, в которой обнаруживается силовое действие на заряженные части-

цы или тела. Условно электрическое поле изображают в виде электрических силовых линий, направление которых совпадает с направлением сил, действующих в нем.

В зависимости от интенсивности поля силовые линии электрического поля изображают расположенными гуще или реже. Среду принято характеризовать особой величиной, называемой диэлектрической проницаемостью.

Абсолютная диэлектрическая проницаемость среды

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

где ϵ_0 — электрическая постоянная, равная абсолютной диэлектрической проницаемости вакуума ($8,86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость — величина, показывающая, во сколько раз в данной среде электрические заряды взаимодействуют между собой слабее, чем в вакууме, и часто называемая просто диэлектрической проницаемостью.

Значение диэлектрической проницаемости некоторых материалов приведено в табл. 1.

В случае наэлектризованного шара силовые линии совпадают с направлением радиусов этого шара, как изображено на рис. 2, а и б.

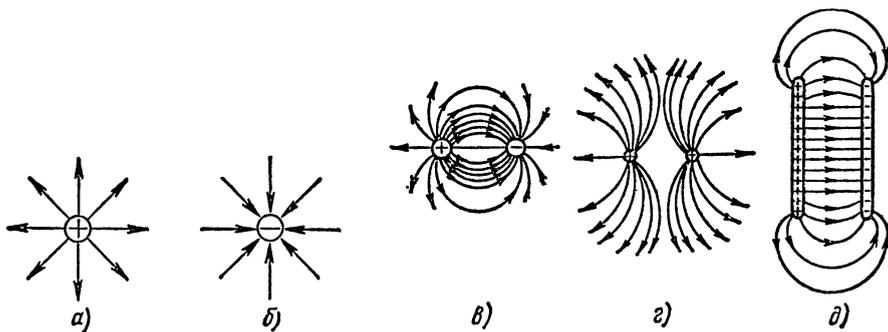


Рис. 2. Условное изображение электрического поля:

а — положительного заряда, б — отрицательного заряда, в — двух разноименных зарядов, г — двух одноименных зарядов, д — между двумя параллельными пластинами с разноименными зарядами

При положительном заряде силовые линии направлены от наэлектризованного тела, при отрицательном — к наэлектризованному телу.

На рис. 2, в и г представлены силовые линии в электрическом поле, созданном двумя наэлектризованными шарами, заряды которых равны, но в одном случае противоположны по знаку, в другом — одинаковы. На рис. 2, д показано электрическое поле между двумя параллельными пластинами, наэлектризованными разноименно.

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

Таблица 1. Электрические свойства диэлектриков

Изолирующие материалы (диэлектрики)	Диэлектрическая проницаемость ϵ	Электрическая прочность, В/см
Воздух	1	30 000
Кабельная бумага	2,3—3,5	60 000—90 000
Трансформаторное масло	2,0—2,5	50 000—180 000
Мрамор	8,3	20 000—30 000
Парафин	2,0—2,2	150 000—500 000
Резина	3,5	100 000—150 000
Слюда	6,0—7,5	1 200 000—2 000 000
Стекло	5,5—10,0	100 000—400 000
Фарфор	3,0—7,5	60 000—100 000
Эбонит	2,0—3,5	80 000—100 000

Закон Кулона гласит: *сила взаимодействия двух точечных электрических зарядов прямо пропорциональна произведению количеств электричества в этих зарядах, обратно пропорциональна расстоянию между ними и зависит от среды, в которой находятся заряды, т. е.*

$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi r^2 \epsilon_a},$$

где F — сила взаимодействия зарядов, Н (ньютон — 102 Г силы); Q_1, Q_2 — заряды, Кл (кулон содержит $6,3 \cdot 10^{18}$ зарядов электрона); кулон — количество электричества, протекающего через поперечное сечение проводника в одну секунду при неизменяющейся силе тока в 1 А, т. е. Кл = А · с; r — расстояние между зарядами, м; ϵ_a — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, Ф/м

$$\left(\frac{\text{фарада}}{\text{метр}} = \text{А} \cdot \text{с} / \text{В} \cdot \text{м} \right).$$

На основании закона Кулона можно сделать вывод, что с увеличением электрических зарядов сила их взаимодействия возрастает, а с увеличением расстояния между ними — уменьшается. Взаимодействие зарядов также зависит от среды, в которой они находятся. Если в вакууме заряды взаимодействуют с определенной силой, то в какой-либо среде, например в трансформаторном масле, сила взаимодействия между этими же зарядами уменьшится в 2,0—2,5 раза, так как увеличится диэлектрическая проницаемость среды.

§ 3. Напряженность электрического поля. Потенциал

Электрическое поле оказывает силовое действие на внесенное в него электрически заряженное тело. Следовательно, электрическое поле может совершить работу, т. е. оно обладает энергией. Каждая точка электрического поля может быть характеризована напряженностью поля E или потенциалом ϕ .

Н а п р я ж е н н о с т ь электрического поля E (В/м) определяется отношением силы F , с которой поле действует на точечный заряд Q , помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда, т. е.

$$E = F/Q.$$

Точечным зарядом называется заряженное тело, линейные размеры которого ничтожно малы и заряд которого в результате этого практически не искажает поля. При Q , равном единице, E численно равно F , следовательно, напряженность электрического поля численно равна силе поля, действующей на единичный заряд. Напряженность поля характеризуется не только величиной, но и направлением, которое совпадает с направлением силы поля, действующей на положительный заряд, находящийся в данной точке. Следовательно, напряженность поля — векторная величина.

Работа сил электрического поля A (Дж) равна произведению силы F (Н) на путь l (м), т. е. $A = Fl$, и $F = A/l$.

Таким образом, единицей измерения напряженности поля является $[E] = [F]/[Q] = \text{джоуль/кулон} \cdot \text{метр} = \text{вольт/метр}$ (В/м).

Для преодоления сил электрического поля при внесении в него электрического заряда необходимо затрачивать определенную работу. Запас энергии (потенциальная энергия) единицы количества электричества, находящейся в данной точке электрического поля, называется п о т е н ц и а л о м.

Потенциал данной точки электрического поля численно равен работе, затрачиваемой на внесение заряда в один кулон из бесконечности в эту точку поля. Эта работа равна потенциальной энергии, которой обладает заряд в один кулон в рассматриваемой точке поля, т. е.

$$\varphi = A/Q.$$

Единицей измерения потенциала является вольт (В).

При перемещении положительного заряда Q в однородном электрическом поле из одной точки в другую на расстояние l в направлении поля силы поля совершают работу A , равную $A = Fl$. Отношение работы A по перемещению заряда Q между двумя точками электрического поля к заряду называется н а п р я ж е н и е м между указанными точками, т. е.

$$U = A/Q.$$

Таким образом, напряжение между двумя точками численно равно работе сил поля при перемещении между этими точками положительного единичного заряда.

Так как потенциалы точек M и N равны φ_M и φ_N , то работа сил поля при перемещении единичного положительного заряда из точки M в точку N , т. е. напряжение между этими точками равно разности их потенциалов:

$$U_{MN} = \varphi_M - \varphi_N.$$

Потенциал Земли принято считать равным нулю, и если проводник соединен с землей, то его потенциал также равен нулю. Положитель-

ный потенциал больше (выше) потенциала земли, а отрицательный меньше (ниже) потенциала Земли.

Поверхность, все точки которой имеют одинаковые потенциалы, называется эквипотенциальной или равнопотенциальной.

§ 4. Проводники и диэлектрики

В металлах электроны, находящиеся на внешних орбитах, слабо связаны с ядром и, оторвавшись от него, находятся в беспорядочном движении в пространстве между атомами. Силы электрического поля сообщают электронам дополнительную составляющую скорости в направлении силы поля, которая во много раз меньше скорости их беспорядочного движения. Под воздействием этой дополнительной составляющей скорости свободные электроны постепенно продвигаются по направлению сил поля. Длительное перемещение заряженных частиц в определенном направлении, налагающееся на их беспорядочное движение в разных направлениях, называется их дрейфом. Таким образом, электрический ток проводимости является дрейфом заряженных частиц.

Материалы, проводящие электрический ток, называются проводниками и к а м и. К ним относятся металлы, уголь, графит, растворы солей, кислот, щелочей. Твердые проводники называются проводниками первого рода, жидкие — проводниками второго рода.

В ряде материалов, называемых диэлектриками, электрический ток проводимости не возникает. У таких материалов электрические заряды молекул прочно связаны внутримолекулярными силами и

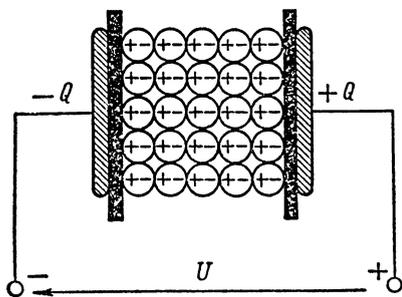


Рис. 3. Смещение зарядов в молекулах диэлектрика под действием сил электрического поля

свободных электронов очень мало. К диэлектрикам относятся мрамор, фарфор, слюда, стекло и др. В молекулах диэлектрика очень трудно отделить отрицательный заряд от положительного, но под действием сил электрического поля внутренние молекулярные заряды упруго смещаются: положительные заряды — по направлению поля, а отрицательные — в обратном направлении (рис. 3). Таким образом, диэлектрик в электрическом поле поляризуется: на поверхности диэлектрика, обращенной к положительно

заряженному проводнику, образуется отрицательный заряд $-Q$, а на противоположной поверхности — положительный заряд $+Q$. С устранением внешнего электрического поля эти заряды исчезают.

§ 5. Электрическая емкость

Система, состоящая из двух проводников, разделенных диэлектриком, называется конденсатором, а проводники — обкладками конденсатора. Если два таких проводника соединить

с полюсами источника электрической энергии, то между ними (в разделяющем их диэлектрике) создается электрическое поле.

Положим, что конденсатор, состоящий из двух металлических пластин *A* и *B* (рис. 4), являющихся его обкладками, подключен к полюсам генератора. Если напряжение этого генератора *U*, то очевидно, что обкладки конденсатора находятся под таким же напряжением *U*. Электрическое поле, возникшее в диэлектрике конденсатора, характеризуется напряженностью. Пусть расстояние между обкладками конденсатора *l*. Напряженность электрического поля представляет собой отношение напряжения на обкладках к расстоянию между ними, т. е.

$$E = U/l.$$

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

Обкладки конденсатора, соединенные с полюсами источника энергии, имеют положительный и отрицательный заряды. Величины зарядов, равные между собой по абсолютной величине, пропорциональны напряжению *U* на обкладках конденсатора. Таким образом, если величину заряда на одной из обкладок обозначить буквой *Q*, то можно написать следующее равенство:

$$Q = CU.$$

В этом равенстве величина *C* является так называемой емкостью конденсатора. Если заряд *Q* выражен в кулонах, а напряжение *U* в вольтах, то емкость выражается в фарадах (Ф). Конденсатор обладает емкостью в 1 Ф, если при заряде в 1 Кл на каждой из обкладок напряжение между ними равно 1 В. Фарада имеет размерность Кл/В = А·с/В.

Более мелкими единицами измерения емкости являются микрофарада (мкФ), равная одной миллионной части фарады, и микромикрофарада (пикофарада) (мккФ), равная одной миллионной части микрофарады, т. е. 1 Ф = 1 000 000 мкФ = 10¹² пФ (пикофарад).

Емкость конденсатора зависит от площади его обкладок, расстояния между ними и диэлектрической проницаемости среды, разделяющей обкладки. Емкость конденсатора тем больше, чем больше площадь *S* его обкладок и диэлектрическая проницаемость среды, разделяющей их, а также, чем меньше расстояние между обкладками:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{l}.$$

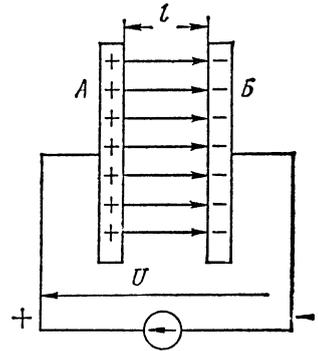


Рис. 4. Принципиальная схема конденсатора

Если напряженность электрического поля в диэлектрике между обкладками конденсатора превзойдет известную предельную величину, то электрический заряд с одной обкладки будет переходить на другую через массу диэлектрика. Такой переход вызывает повреждение изолирующего слоя конденсатора.

В табл. 1 приведены величины предельных напряженностей изолирующих материалов, характеризующие электрическую прочность.

Рассмотренное нами свойство находящихся под напряжением конденсаторов накапливать на обкладках электрические заряды, определяющие емкость этих конденсаторов, присуще также линейным проводам и кабелям.

Например, провод, подвешенный на изоляторах, можно рассматривать как одну из обкладок конденсатора, другой обкладкой которого является поверхность Земли. Следовательно, такой провод обладает известной емкостью относительно Земли. Аналогично два провода одной и той же цепи можно рассматривать как обкладки конденсатора, разделенные воздухом, являющимся диэлектрической прослойкой.

§ 6. Заряд и разряд конденсатора

При подключении конденсатора к источнику энергии (см. рис. 4) происходит заряд конденсатора до напряжения между обкладками U , равного напряжению этого источника E . Обкладка, соединенная с положительным полюсом источника, получит положительный заряд $+Q$, а вторая обкладка — равный по величине отрицательный заряд $-Q$, причем $Q=CU$. Для заряда конденсатора необходимо, чтобы одна из обкладок потеряла, а другая приобрела некоторое количество свободных электронов. Переход электронов с одной обкладки конденсатора на другую происходит под действием напряжения источника по проводам, соединяющим этот источник с обкладками конденсатора. Движение этих зарядов называется током зарядки конденсатора.

В момент включения конденсатора зарядов на его обкладках нет и напряжение на нем равно нулю $u_c=0$. Поэтому зарядный ток определяется внутренним сопротивлением источника r_b и имеет наибольшую величину:

$$I_{3 \max} = E/r_b.$$

По мере накопления зарядов на обкладках конденсатора напряжение на нем увеличивается и падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника будет равно разности эдс источника и напряжения на конденсаторе $(E-u_c)$. Следовательно, зарядный ток

$$i_3 = (E-u_c)/r_b.$$

Таким образом, с повышением напряжения на конденсаторе ток заряда уменьшается и при $u_c=E$ становится равным нулю. Процесс изменения напряжения на конденсаторе и тока заряда во времени изображен на рис. 5. В начальный момент заряда конденсатора напряжение на нем быстро возрастает, так как ток заряда имеет большую величину и накопление зарядов на обкладках конденсатора происхо-

дит интенсивно. По мере повышения напряжения на конденсаторе зарядный ток уменьшается и накопление зарядов на обкладках замедляется. Продолжительность заряда конденсатора зависит от его емкости и сопротивления цепи, увеличение которых приводит к возрастанию продолжительности заряда. С повышением емкости конденсатора возрастает количество зарядов, накапливаемых на его обкладках, а с увеличением сопротивления цепи уменьшается зарядный ток, что замедляет процесс накопления зарядов на этих обкладках.

Если заряженный конденсатор замкнуть на какое-либо сопротивление R , то под действием напряжения на конденсаторе будет протекать ток разряда конденсатора. Разряд конденсатора сопровождается переносом электронов с одной пластины (где их избыток) на другую (где их недостаток) и продолжается до тех пор, пока потенциалы обкладок не станут одинаковыми, т. е. напряжение на конденсаторе не уменьшится до нуля. Изменение напряжения в процессе разряда конденсатора изображено на рис. 6. Ток разряда конденсатора пропорционален напряжению на конденсаторе ($i_p = u_c/R$), и его изменение во времени подобно изменению напряжения.

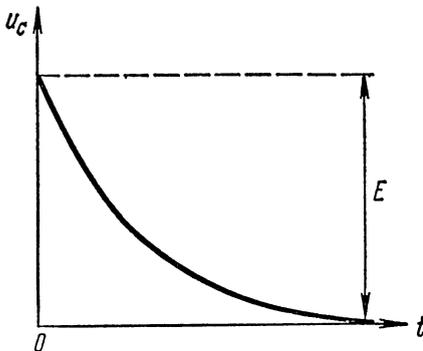


Рис. 6. График изменения напряжения на конденсаторе при разряде

Продолжительность разряда. С повышением сопротивления разрядный ток уменьшается, замедляя процесс переноса зарядов с одной обкладки на другую; с возрастанием емкости конденсатора увеличивается заряд на обкладках.

Таким образом, в цепи, содержащей конденсатор, ток проходит только в процессе его заряда и разряда, т. е. когда напряжение на обкладках претерпевает изменение во времени. При постоянстве напря-

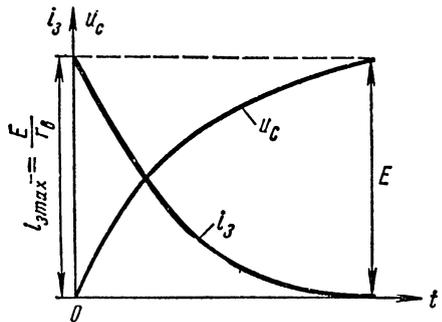


Рис. 5. График изменения напряжения на конденсаторе и тока при заряде

В начальный момент разряда напряжение на конденсаторе наибольшее ($u_c = E$) и разрядный ток максимальный ($I_{p\max} = E/R$), так что разряд происходит быстро. По мере понижения напряжения разрядный ток уменьшается и процесс переноса зарядов с одной обкладки на другую замедляется.

Продолжительность процесса разряда конденсатора зависит от сопротивления цепи и емкости конденсатора, причем возрастание как сопротивления, так и емкости увеличивает продолжи-

жения ток через конденсатор не проходит, т. е. конденсатор не пропускает постоянный ток, так как между его обкладками помещен диэлектрик и в результате этого цепь разомкнута.

При заряде конденсатора накапливает электрическую энергию, потребляя ее от энергоисточника. Накопленная энергия сохраняется определенное время. При разряде конденсатора эта энергия переходит к разрядному резистору, нагревая его, т. е. энергия электрического поля превращается в тепловую. Чем больше емкость конденсатора и напряжение между его обкладками, тем больше энергия, запасенная на нем. Энергия электрического поля конденсатора определяется следующим выражением:

$$W = CU^2/2.$$

Если конденсатор емкостью 100 мкФ заряжен до напряжения 200 В, то энергия, запасенная в электрическом поле конденсатора, $W = 100 \cdot 10^{-6} \cdot 200^2/2 = 2$ Дж.

§ 7. Устройство конденсаторов

В зависимости от типа диэлектрика, разделяющего обкладки, конденсаторы бывают бумажные, слюдяные, керамические, электролитические и воздушные.

В бумажных конденсаторах обкладками являются полосы алюминиевой или свинцовой фольги, а диэлектриком служит специальная (конденсаторная) тонкая бумага, пропитанная парафином или минеральным маслом. Полосы фольги вместе с разделяющей их бумагой сворачивают в рулон и после пропитки устанавливают в металлический герметизированный корпус.

В слюдяных конденсаторах между полосами металлической фольги, являющимися обкладками, помещают тонкие пластины слюды. Полосы фольги соединяют через одну, образуя несколько плоских конденсаторов, и в собранном виде запрессовывают в пластмассу, что делает конденсатор не подверженным влиянию окружающей среды.

В керамических конденсаторах диэлектриком служит керамика, на которую наносят металлические обкладки.

В электролитических конденсаторах между обкладками из алюминиевой фольги помещают фильтровальную бумагу или матерiu, пропитанную электролитом. Обкладки вместе с изолирующими прокладками сворачивают в плотный рулон и помещают в алюминиевый корпус, который после сборки конденсатора заливают смолой и закрывают изоляционной крышкой. В процессе изготовления конденсатора через него пропускают постоянный ток, подключая обкладки к источнику энергии. В результате электролиза полоса фольги, соединенная с положительным полюсом источника, окисляется и покрывается тонким слоем окиси алюминия, служащей диэлектриком. Положительным полюсом конденсатора является вывод от фольги, покрытый пленкой окиси алюминия. Этот вывод делают через верхнюю изоляционную крышку и обозначают знаком «плюс». Отрицательным полюсом «минус»

служит корпус, соединенный внутри с фольгой, не покрытой слоем окиси алюминия.

При использовании электролитических конденсаторов в схемах включение их должно быть выполнено со строгим соблюдением полярности. Если электролитический конденсатор окажется включенным неправильно и на корпусе его будет положительный потенциал, то вновь начнется электролиз, вследствие которого фольга, соединенная с корпусом, будет окисляться, а первоначальная пленка окиси — разрушаться, что приведет к пробое конденсатора и короткому замыканию цепи. Таким образом, электролитический конденсатор не может быть использован в цепи переменного тока. Область его применения ограничена цепями, где проходит неизменный по направлению ток — постоянный или пульсирующий с небольшим отклонением от постоянной составляющей (до 10—15%).

Достоинством электролитических конденсаторов является большая емкость при малых габаритах, что объясняется малой толщиной пленки окиси алюминия, служащей диэлектриком. Однако емкость электролитического конденсатора в сильной степени зависит от напряжения и температуры: уменьшается при повышении напряжения и понижении температуры. Повышение напряжения приводит к увеличению толщины слоя окиси, а понижение температуры — к увеличению вязкости и сопротивления электролита. При очень низких температурах электролит замерзает и конденсатор может выйти из строя. В процессе работы конденсатора электролит со временем высыхает и емкость конденсатора также уменьшается.

В радиотехнике часто требуется изменить емкость конденсатора, для чего применяют воздушные конденсаторы переменной емкости (рис. 7, а). Обкладками такого конденсатора служат две системы алюминиевых пластин, одна из которых неподвижная (статор), а другая — подвижная (ротор) и может поворачиваться вокруг оси, заходя в промежутки между неподвижными пластинами. При повороте ротора изменяется площадь пластин, перекрывающих друг друга, что вызывает изменение емкости.

Конденсатор полупеременной емкости (рис. 7, б) также имеет неподвижную (статор) и подвижную (ротор) системы пластин. Основание

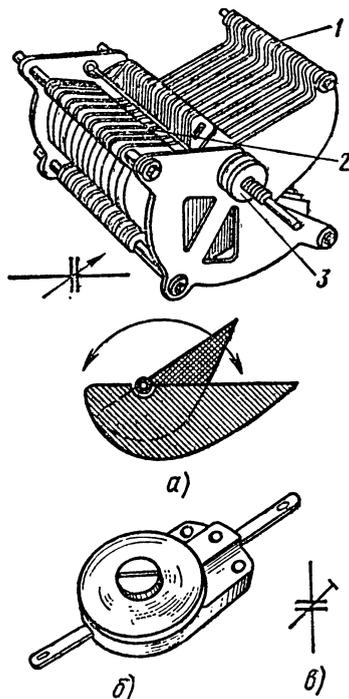


Рис. 7. Конденсаторы переменной (а) и полупеременной (б) емкости и их условные обозначения (а):
1 — ротор, 2 — статор, 3 — гайка крепления

пластин изготовлено из керамики, а на них нанесен слой серебра. Поворотом винта перемещают ротор и тем самым изменяют емкость конденсатора.

Условное обозначение конденсатора приведено на рис. 7, в.

После заряда конденсатор определенное время сохраняет запасенную энергию и напряжение на нем остается почти неизменным. Однако при длительном хранении конденсатор окажется полностью разряженным. Это явление называется саморазрядом конденсатора. Оно объясняется тем, что любой диэлектрик — не идеальный изолятор и содержит небольшое количество свободных электронов. Поэтому под действием разности потенциалов заряды переносятся с одной обкладки на другую при разомкнутых зажимах конденсатора, т. е. появляется ток через диэлектрик, называемый током утечки. Ток утечки обычно очень мал и зависит от напряжения, температуры и влажности, с увеличением которых он возрастает.

Если напряжение на обкладках конденсатора непрерывно повышать, то ток утечки будет возрастать, и при определенной величине напряжения диэлектрик разрушится, т. е. произойдет пробой конденсатора. Напряжение, при котором происходит пробой конденсатора, называется н а п р я ж е н и е м п р о б о я $U_{пр}$ и определяет электрическую прочность конденсатора.

На каждом конденсаторе указывается его рабочее и испытательное напряжения. Рабочим называется такое наибольшее напряжение, при котором конденсатор может работать длительное время, не подвергаясь опасности пробоя. Испытательное напряжение в 2—3 раза больше рабочего и представляет собой наибольшее напряжение, которое выдерживает конденсатор в течение 1 мин при испытании.

§ 8. Соединение конденсаторов

Соединение отдельных конденсаторов между собой может быть параллельным (рис. 8, а) и последовательным (рис. 8, б).

При п а р а л л е л ь н о м соединении нескольких конденсаторов емкость их равна сумме емкостей отдельных конденсаторов, входящих в состав соединения, так как параллельное соединение конденсаторов подобно увеличению поверхности обкладок. Например, если конденсаторы с емкостями C_1 , C_2 и C_3 включены параллельно, то емкость

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

При п о с л е д о в а т е л ь н о м включении нескольких конденсаторов емкость их определяется на основании следующего положения: обратная величина емкости последовательно соединенных конденсаторов равна сумме обратных величин емкостей конденсаторов, входящих в состав соединения. Например, если три конденсатора с емкостями соответственно C_1 , C_2 и C_3 включены последовательно, то емкость C такого магазина конденсаторов определится

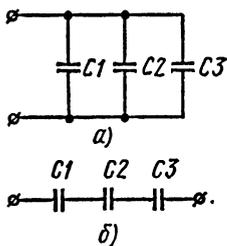


Рис. 8. Схема соединения конденсаторов:
а — параллельного, б — последовательного

из следующего соотношения:

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

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

Контрольные вопросы

1. Что называется электрическим полем?
2. Что называется напряженностью электрического поля?
3. От каких величин зависит сила взаимодействия электрических зарядов?
4. Что представляет собой электрический потенциал?
5. В чем отличие проводников от диэлектриков?
6. От каких величин зависит емкость плоского конденсатора?
7. Каким образом изменяется напряжение на обкладках конденсатора при его заряде и разряде?

Глава II

ПОСТОЯННЫЙ ТОК И ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 9. Электрическая цепь постоянного тока

Простейшая электрическая цепь (рис. 9) содержит источник электрической энергии Γ , приемник энергии Π и два линейных провода \mathcal{L}_1 и \mathcal{L}_2 , соединяющих источник с приемником. Линейные провода подключаются к источнику электрической энергии при помощи двух зажимов, называемых положительным (+) и отрицательным (-) полюсами.

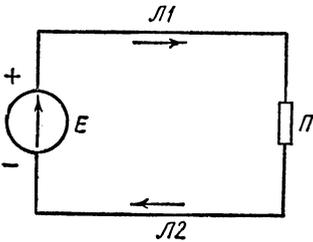


Рис. 9. Простейшая электрическая цепь

Источник электрической энергии преобразует механическую, химическую и тепловую или другого вида энергию в электрическую энергию. В приемнике электрическая энергия преобразуется в энергию другого вида — механическую,

тепловую, химическую, световую и др.

Источниками электрической энергии служат генераторы (электрические машины, приводимые в движение какими-либо механическими двигателями), аккумуляторы и гальванические элементы, условное

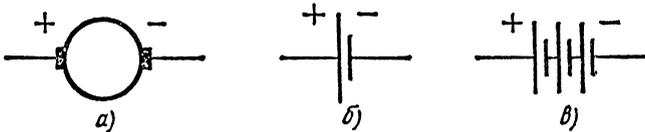


Рис. 10. Условное обозначение:

а — генератора постоянного тока, *б* — аккумуляторов и гальванических элементов, *в* — батареи аккумуляторов и гальванических элементов

обозначение которых показано на рис. 10. В качестве приемников электрической энергии применяют осветительные лампы, электрические двигатели, электронагревательные приборы и пр.

Как гальванические элементы, так и аккумуляторы соединяют между собой для составления в первом случае батарей гальванических элементов, а во втором — батареи аккумуляторов. Источник электрической энергии с присоединенными к нему линейными проводами и приемником энергии образуют замкнутую электрическую цепь, по которой происходит непрерывное движение зарядов, называемое **э л е к т р и ч е с к и м т о к о м**.

Постоянный ток в металлических проводниках представляет собой установившееся поступательное движение свободных электронов в замкнутой цепи. На схемах условно принято обозначать положительные направления тока и напряжения стрелками от плюса к минусу.

Ток в двух проводниках, находящихся один от другого на определенном расстоянии, вызывает механические силы, действующие на эти проводники. Единицей измерения тока является ампер (А). В международной системе единиц (СИ) ампер — неизменяющийся ток, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого круглого сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ ньютона (Н) на каждый метр длины.

Единицей силы в Международной системе единиц является ньютон (Н); $H = \frac{кг \cdot м}{с}$, где кг — килограмм массы, м — метр, с — секунда.

Э л е к т р и ч е с к и й ток определяет количество электричества, проходящего через поперечное сечение проводника в единицу времени. Если в проводнике протекает ток 1 А, то через поперечное сечение этого проводника в течение 1 с протекает 1 Кл электричества.

Линейные провода и приемник энергии составляют внешнюю цепь, в которой ток проходит под действием разности потенциалов на зажимах источника энергии и направлен от точки более высокого потенциала (положительного зажима) к точке более низкого потенциала (отрицательного зажима).

§ 10. Электродвижущая сила

В замкнутой цепи электрический ток протекает под действием электродвижущей силы (эдс) источника энергии.

Электродвижущая сила возникает в источнике и при отсутствии тока в цепи, т. е. когда цепь разомкнута. При холостом ходе, т. е. при отсутствии тока в цепи эдс равна разности потенциалов на зажимах источника энергии. Так же как и разность потенциалов, эдс измеряется в вольтах (В).

Как при замкнутой, так и при разомкнутой электрической цепи эдс непрерывно поддерживает разность потенциалов на зажимах источника энергии. Для непрерывного прохождения тока в замкнутой цепи необходимо движение зарядов внутри источника тока в направлении, обратном действию поля. Такое перемещение зарядов происходит под действием сторонних сил.

В наличии эдс можно убедиться, если присоединить к полюсам источника энергии (вместо линейных проводов) прибор, называемый вольтметром. Стрелка вольтметра при этом отклонится на некоторый угол. Отклонение будет тем больше, чем больше эдс источника энергии. Однако вольтметр покажет не величину эдс, а, как мы увидим дальше, напряжение на зажимах источника, которое так же, как и эдс, измеряется в вольтах (В), киловольтах (кВ), милливольтмах (мВ).

§ 11. Электрическое сопротивление

Направленному движению электрических зарядов в любом проводнике препятствуют его молекулы и атомы. Поэтому как внешняя цепь, так и сам источник энергии оказывают препятствие прохождению тока. Величина, характеризующая противодействие электрической цепи прохождению электрического тока, называется

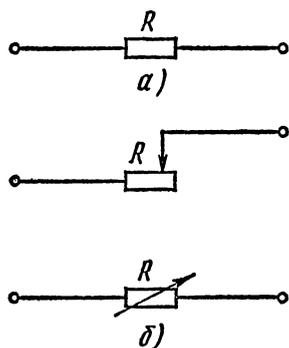


Рис. 11. Условное обозначение:

a — резистора (сопротивления),
б — реостата (регулируемое сопротивление)

электрическим сопротивлением (или, короче, сопротивлением).

Источник электрической энергии, включенный в замкнутую электрическую цепь, расходует энергию на преодоление сопротивления внешней и внутренней цепей.

Электрическое сопротивление обозначается буквой R (r) и на схемах изображается так, как показано на рис. 11, *a*. Устройства, включаемые в электрическую цепь и обладающие сопротивлением, называются **резисторами**.

Единицей измерения сопротивления является Ом. Омом называется электрическое сопротивление такого линейного проводника, в котором при неизменяющейся разности потенциалов в 1 В проходит ток в 1 А, т. е. $1 \text{ Ом} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}}$.

При измерении больших сопротивлений используют единицы в тысячу и в миллион раз больше ома. Они называются килоомом (кОм) и мегомом (МОм); $1 \text{ кОм} = 1000 \text{ Ом}$; $1 \text{ МОм} = 1\,000\,000 \text{ Ом}$.

Сопротивление проводников электрическому току зависит от материала, из которого они изготовлены, а также от длины и площади поперечного сечения проводника.

Для оценки электрических свойств материала проводника служит **удельное сопротивление** — это сопротивление проводника длиной в 1 м и площадью поперечного сечения в 1 мм^2 . Удельное сопротивление обозначается буквой ρ .

Если проводник, изготовленный из материала с удельным сопротивлением ρ , имеет длину l метров и площадь поперечного сечения s квадратных миллиметров, то сопротивление всего проводника

$$R = \rho l/s.$$

Эта формула указывает на то, что сопротивление проводника прямо пропорционально удельному сопротивлению материала, из которого он изготовлен, а также его длине и обратно пропорционально площади поперечного сечения.

Сопротивление проводников зависит от температуры, причем сопротивление металлических проводников с повышением температуры увеличивается. Для каждого металла существует определенный, так называемый температурный коэффициент сопротивления α , который

выражает прирост сопротивления проводника при изменении температуры на 1°C , отнесенный к 1 Ом начального сопротивления.

Соотношение между сопротивлениями R_2 и R_1 :

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha (T_2 - T_1)],$$

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

Следует иметь в виду, что это соотношение справедливо при не очень высоких температурах, а для определения сопротивлений при температурах выше $100\text{—}150^\circ\text{C}$ оно не может быть использовано.

Регулируемые резисторы называются **реостатами**. Реостаты изготовляют из проволоки с большим удельным сопротивлением, например из нихрома. Сопротивление реостатов может изменяться равномерно или ступенями. На схемах реостаты условно обозначают так, как показано на рис. 11, б.

Способность проводника пропускать электрический ток характеризуется проводимостью, которая представляет собой величину, обратную сопротивлению, и обозначается буквой g . Единицей измерения проводимости является $\frac{1}{\text{Ом}} = \text{См}$ (сименс).

Таким образом, соотношение между сопротивлением и проводимостью проводника следующее: $g = 1/R$ и $R = 1/g$.

Величина, обратная удельному сопротивлению материала проводника, называется удельной проводимостью и обозначается буквой γ . Таким образом, между удельным сопротивлением и удельной проводимостью вещества имеет место следующая связь: $\gamma = 1/\rho$.

§ 12. Закон Ома

Соотношение между эдс, сопротивлением и током в замкнутой цепи выражается **законом Ома**, который может быть сформулирован так: *ток в замкнутой цепи прямо пропорционален электродвижущей силе и обратно пропорционален сопротивлению всей цепи.*

Ток в цепи возникает под действием эдс; чем больше эдс источника энергии, тем больше ток в замкнутой цепи. Сопротивление цепи препятствует прохождению тока, следовательно, чем больше сопротивление цепи, тем меньше ток.

Закон Ома можно выразить следующей формулой:

$$I = \frac{E}{R + R_0}$$

или

$$E = I(R + R_0),$$

где R — сопротивление внешней части цепи; R_0 — внутреннее сопротивление источника.

В этих формулах ток выражен в амперах, эдс — в вольтах, сопротивление в омах.

Для выражения малых токов вместо ампера применяют единицу, в тысячу раз меньшую ампера, называемую миллиампером (мА); $1 \text{ A} = 1000 \text{ mA}$.

Сопротивление всей цепи

$$R + R_0 = E/I.$$

Закон Ома справедлив не только для всей цепи, но и для любого его участка.

Если участок цепи не содержит источника энергии, то положительные заряды на этом участке перемещаются из точек более высокого потенциала к точкам более низкого потенциала. Источник энергии затрачивает известную энергию, поддерживая разность потенциалов между началом и концом этого участка. Эта разность потенциалов называется напряжением между началом и концом рассматриваемого участка.

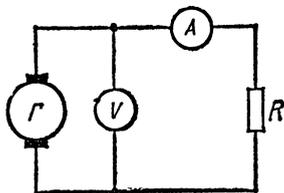


Рис. 12. Схема включения амперметра и вольтметра

Таким образом, применяя закон Ома для участка цепи, получим:

$$I = U/R.$$

Закон Ома можно сформулировать следующим образом: *ток на участке электрической цепи равен напряжению на зажимах этого участка, деленному на его сопротивление.*

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

Из выражения закона Ома для замкнутой цепи получим:

$$E = IR + IR_0 = U + IR_0,$$

где IR — падение напряжения в сопротивлении R , т. е. во внешней цепи, или, иначе, напряжение на зажимах источника энергии (генератора) U , IR_0 — падение напряжения в сопротивлении R_0 , т. е. внутри источника энергии (генератора).

Для измерения тока в цепи используется прибор, называемый амперметром (миллиамперметром). Напряжение, как указывалось выше, измеряется вольтметром. Для включения амперметра цепь тока разрывается и в месте разрыва концы проводов присоединяются к зажимам амперметра (рис. 12). Таким образом, через прибор проходит весь измеряемый ток. Вольтметр показывает падение напряжения на данном участке. Если вольтметр подключить к началу внешней цепи — положительному полюсу источника энергии и к концу внешней цепи — к отрицательному полюсу источника энергии, то он покажет падение напряжения во всей внешней цепи, которое будет в то же время напряжением на зажимах источника энергии.

Напряжение на зажимах источника энергии (генератора) равно разности между эдс и падением напряжения на внутреннем сопротивлении этого источника, т. е.

$$U = E - IR_0.$$

Если уменьшать сопротивление внешней цепи R , то сопротивление всей цепи $R+R_0$ также уменьшится, а ток в цепи увеличится. С увеличением тока падение напряжения внутри источника энергии (IR_0) возрастает, так как внутреннее сопротивление R_0 источника энергии остается неизменным. Следовательно, с уменьшением сопротивления внешней цепи напряжение на зажимах источника энергии также уменьшается. При соединении зажимов источника энергии с проводником, сопротивление которого практически равно нулю, ток в цепи $I=E/R_0$. Это выражение определяет наибольший ток, который может быть получен в цепи данного источника.

Режим, при котором сопротивление внешней цепи практически равно нулю, называется режимом короткого замыкания.

Для источников энергии с малым внутренним сопротивлением, например для электрических генераторов (электромашин) и кислотных аккумуляторов, короткое замыкание весьма опасно — оно может вывести из строя эти источники. Короткое замыкание может возникнуть, например, из-за нарушения изоляции проводов, соединяющих приемник с источником энергии. Лишенные изолирующего покрова металлические (обычно медные) линейные провода при взаимном соприкосновении образуют весьма малое сопротивление, которое по сравнению с сопротивлением приемника может быть принято равным нулю.

Для защиты электротехнической аппаратуры от токов коротких замыканий применяют различные предохранительные устройства.

§ 13. Последовательное соединение резисторов

Электрическая цепь может содержать несколько приемников энергии, имеющих различные сопротивления.

Предположим, что внешняя цепь генератора (рис. 13) состоит из трех приемников энергии с сопротивлениями R_1, R_2, R_3 . Такое соединение приемников, при котором каждый из них поочередно включен в одну замкнутую электрическую цепь, называется последовательным. Очевидно, что ток при этом во всех приемниках одинаков, а сопротивление внешней цепи равно сумме сопротивлений приемников.

Для нашего случая формула закона Ома имеет следующий вид:

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

Таким образом, при наличии трех последовательно соединенных проводников эквивалентное сопротивление цепи $R = R_0 + R_1 + R_2 + R_3$, а сопротивление внешней цепи $R' = R_1 + R_2 + R_3$.

Напряжение на зажимах источника энергии равно напряжению, приложенному к внешней цепи, т. е. $U = E - IR_0 = I(R_1 + R_2 + R_3)$, где IR_0 — падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника энергии.

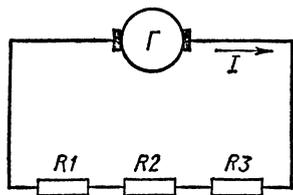


Рис. 13. Последовательное включение резисторов

Напряжение на зажимах последовательно соединенных приемников энергии равно произведению силы тока на сопротивление приемника, т. е. $U_1=IR_1$; $U_2=IR_2$; $U_3=IR_3$; $U_1+U_2+U_3=U$.

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

Так как на всех участках цепи, состоящей из последовательно соединенных приемников, ток одинаков, то напряжения пропорциональны их сопротивлениям или обратно пропорциональны проводимостям, т. е. $U_1 : U_2 : U_3 = R_1 : R_2 : R_3 = 1/g_1 : 1/g_2 : 1/g_3$.

При неизменном напряжении ток зависит от сопротивления цепи. Поэтому изменение сопротивления одного из последовательно включенных приемников влечет за собой изменение как общего сопротивления всей цепи, так и тока в ней. При этом изменяются напряжения на всех приемниках.

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

§ 14. Первый закон Кирхгофа

Для цепей, состоящих из последовательно соединенных источника и приемника энергии, соотношение между током, эдс и сопротивлением всей цепи или между током, напряжением и сопротивлением на каком-либо участке цепи определяется законом Ома. Однако на практике в

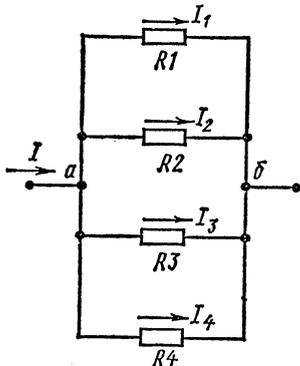


Рис. 14. Разветвленная цепь

цепях токи от какой-либо точки преимущественно идут по разным путям и, следовательно, есть точки, где сходятся несколько проводников. Эти точки называются узлами и (узловыми точками), а участки цепи, соединяющие два соседних узла, — ветвями цепи. В замкнутой электрической цепи ни в одной ее точке не могут скапливаться электрические заряды, так как это вызвало бы изменение потенциалов точек цепи. Поэтому электрические заряды, притекающие к какому-либо узлу в единицу времени, равны зарядам, утекающим от этого узла за ту же единицу времени.

Положим, что в узле *a* (рис. 14) цепь разветвляется на четыре ветви, которые вновь сходятся в узле *б*. Обозначим токи в неразветвленной части цепи через I , а в ветвях соответственно I_1 , I_2 , I_3 и I_4 .

Между этими токами в такой цепи будет следующее соотношение:

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

Если в узле сходятся несколько проводов с различным направлением тока (рис. 15), то

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

Это выражение представляет собой **первый закон Кирхгофа**, который формулируется следующим образом: *сумма токов, подходящих к узлу (узловой точке) электрической цепи, равна сумме токов, уходящих от этого узла, или алгебраическая сумма токов в узловой точке электрической цепи равна нулю*, причем притекающие к узлу токи принято считать положительными, а утекающие от узла — отрицательными.

§ 15. Параллельное и смешанное соединение резисторов

П а р а л л е л ь н о с о е д и н е н н ы м и называются элементы электрической цепи, находящиеся под одним и тем же напряжением.

При параллельном соединении резисторов (см. рис. 14) ток проходит по четырем направлениям, что уменьшит общее сопротивление или увеличит общую проводимость цепи, которая равна сумме проводимостей отдельных ветвей.

Таким образом, обозначив проводимость всех ветвей буквой g , а проводимость каждой ветви g_1 , g_2 , g_3 и g_4 , получим следующее равенство:

$$g = g_1 + g_2 + g_3 + g_4.$$

Докажем полученное соотношение. Обозначив силу тока в неразветвленной ветви буквой I , силу тока в отдельных ветвях соответственно I_1 , I_2 , I_3 и I_4 , напряжение между точками a и b — U и общее сопротивление между этими точками — R , на основании закона Ома напишем следующие равенства: $I = U/R$; $I_1 = U/R_1$; $I_2 = U/R_2$; $I_3 = U/R_3$; $I_4 = U/R_4$.

Согласно первому закону Кирхгофа $I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$ или $U/R = U/R_1 + U/R_2 + U/R_3 + U/R_4$.

Сократив обе части полученного выражения на U , окончательно получим: $1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3 + 1/R_4$, что и требовалось доказать.

Установленное соотношение справедливо для любого числа параллельно соединенных резисторов. В частном случае, если в электрической цепи содержится два параллельно соединенных резистора R_1 и R_2 , то можно написать следующее равенство: $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$.

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

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

Полученное выражение имеет большое практическое применение; его можно сформулировать так: сопротивление двух параллельно соединенных приемников энергии равно произведению сопротивлений этих приемников, деленному на сумму тех же сопротивлений.

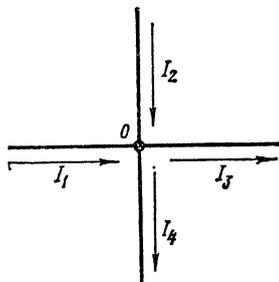


Рис. 15. Узловая точка

Если параллельно соединено какое-либо число n одинаковых резисторов R , то общее сопротивление такой цепи будет в n раз меньше сопротивления одного резистора, т. е. $R_{\text{общ}} = R/n$.

Возвращаясь к рис. 14, напишем следующие соотношения: $I_1 R_1 = U$; $I_2 R_2 = U$; $I_3 R_3 = U$; $I_4 R_4 = U$.

Так как правые части этих равенств равны между собой, то левые также равны: $I_1 R_1 = I_2 R_2 = I_3 R_3 = I_4 R_4$.

Из этих равенств получим следующие соотношения: $I_1/I_2 = R_2/R_1$; $I_2/I_3 = R_3/R_2$ и т. д.

Эти соотношения указывают на то, что в цепях с параллельно включенными сопротивлениями токи распределяются обратно пропорционально этим сопротивлениям. Таким образом, чем больше величина

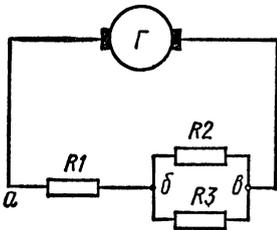


Рис. 16. Смешанное соединение резисторов

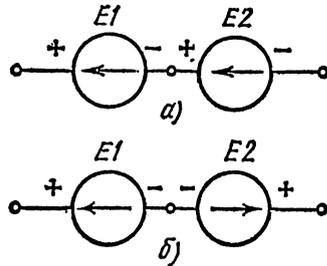


Рис. 17. Соединение источников электрической энергии:
а — согласное, б — встречное

включенного параллельно сопротивления, тем меньше ток в этом сопротивлении, и наоборот. Сопротивление является величиной, обратной проводимости, следовательно, в цепях с параллельно соединенными резисторами токи распределяются прямо пропорционально проводимости этих резисторов.

Если напряжение между узлами не изменяется, то токи в резисторах, включенных между этими узлами, в отличие от последовательного включения их, независимы один от другого. Выключение одного или нескольких резисторов из цепи не отражается на работе остальных, оставшихся включенными. Поэтому осветительные лампы, электродвигатели и другие приемники электрической энергии преимущественно включают параллельно.

Если в электрической цепи резисторы, соединенные параллельно между собой, включены последовательно с другими резисторами, то такое соединение их называется смешанным. Для определения эквивалентного сопротивления нескольких резисторов, соединенных смешанно, сначала находят сопротивление параллельно или последовательно соединенных резисторов, а затем заменяют их одним резистором с сопротивлением, равным найденному. Например, для определения сопротивления между точками a и $в$ (рис. 16) сначала находят сопротивление между точками $б$ и $в$: $R' = R_2 R_3 / (R_2 + R_3)$, а затем

складывают полученное значение сопротивления с сопротивлением R_1 :

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

§ 16. Второй закон Кирхгофа

Второй закон Кирхгофа может быть сформулирован следующим образом: *во всяком замкнутом контуре электрической цепи алгебраическая сумма всех эдс равна алгебраической сумме падений напряжения в сопротивлениях того же контура*, т. е.

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

При составлении уравнений выбирают направление обхода цепи и произвольно задаются направлениями токов.

Если в электрической цепи включены два источника энергии, эдс которых совпадают по направлению, т. е. согласно (рис. 17,а), то эдс всей цепи равна сумме эдс этих источников, т. е. $E = E_1 + E_2$.

Если же в цепь включено два источника, эдс которых имеют противоположные направления, т. е. включены встречно (рис. 17,б), то общая эдс цепи равна разности эдс этих источников $E = E_1 - E_2$.

При последовательном включении в электрическую цепь нескольких источников энергии с различным направлением эдс общая эдс равна алгебраической сумме эдс всех источников. Суммируя, эдс одного направления берут со знаком плюс, а эдс противоположного направления — со знаком минус.

Обычно замкнутая цепь является частью сложной цепи, как показано, например, на рис. 18. Замкнутая цепь обозначена буквами a , b , $в$ и $г$. Из-за ответвлений в точках a , $б$, $в$ и $г$ токи I_1 , I_2 , I_3 и I_4 , отличающиеся по величине, могут иметь и различные направления. Для такой цепи в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно написать: $E_1 - E_2 - E_3 = I_1(R_{01} + R_1) - I_2(R_{02} + R_2) - I_3(R_{03} + R_3) + I_4 R_4$, где R_{01} , R_{02} , R_{03} — внутренние сопротивления источников энергии; R_1 , R_2 , R_3 , R_4 — сопротивления приемников энергии.

Если внешняя цепь источника энергии с внутренним сопротивлением R_0 состоит, например, из трех последовательно соединенных резисторов с сопротивлениями, соответственно равными R_1 , R_2 , R_3 , то на основании второго закона Кирхгофа можно написать следующее равенство:

$$E = I(R_0 + R_1 + R_2 + R_3).$$

При нескольких источниках тока в левой части этого равенства была бы алгебраическая сумма эдс этих источников.

При параллельном включении двух или нескольких источников энергии токи, проходящие в них, в общем случае неодинаковы.

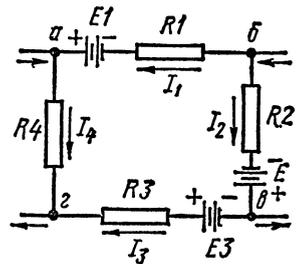


Рис. 18. Замкнутая электрическая цепь

Если два параллельно соединенных источника энергии (рис. 19), имеющих эдс E_1 и E_2 и внутренние сопротивления R_1 и R_2 , замкнуть на какое-либо внешнее сопротивление R , то токи во внешней цепи I и в источниках I_1 и I_2 можно определить из следующих выражений:

$$I = I_1 + I_2; \quad I = \frac{U}{R}; \quad I_1 = \frac{E_1 - U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{E_2 - U}{R_2}.$$

Отсюда ток во внешней цепи

$$I = \frac{E_1 R_2 + E_2 R_1}{R_1 R_2 + R R_1 + R R_2}.$$

Токи, протекающие через первый и второй источники энергии,

$$I_1 = \frac{E_1 - IR}{R_1} \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{E_2 - IR}{R_2}.$$

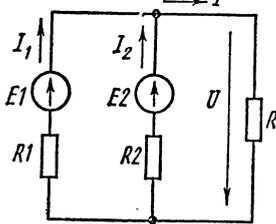
§ 17. Расчет сложных электрических цепей

В сложных электрических цепях может содержаться несколько замкнутых контуров с любым размещением в них источников энергии и потребителей. Поэтому такие сложные цепи нельзя свести к сочетанию последовательных и параллельных соединений.

Используя закон Ома и два закона Кирхгофа, можно найти распределение токов и напряжений на всех участках любой сложной цепи.

Одним из методов расчета сложных электрических цепей является метод наложения токов, сущность которого заключается в том, что ток в какой-либо ветви является алгебраической суммой токов, создаваемой в ней каждой эдс цепи в отдельности. На рис. 20 изображена цепь, содержащая три источника с эдс E_1 , E_2 , E_3 и четыре последовательно соединенных резистора R_1 , R_2 , R_3 , R_4 . Если пренебречь внутренним сопротивлением источников энергии, то эквивалентное сопротивление цепи равно $R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$. Допустим

Рис. 19. Параллельное соединение источников энергии



сначала, что эдс первого источника $E_1 \neq 0$, а второго и третьего равны нулю, т. е. $E_2 = 0$ и $E_3 = 0$. Затем положим $E_2 \neq 0$, а $E_1 = 0$ и $E_3 = 0$. И, наконец, полагаем $E_3 \neq 0$, а $E_1 = 0$ и $E_2 = 0$. В первом случае ток в цепи, совпадающий по направлению с эдс E_1 , равен $I_1 = E_1/R$; во втором случае ток в цепи, совпадающий по направлению с эдс E_2 равен $I_2 = E_2/R$; в третьем случае ток равен $I_3 = E_3/R$ и совпадает по направлению с эдс E_3 . Так как E_1 и E_3 совпадают по направлению в контуре, то токи I_1 и I_3 также совпадают, а ток I_2 имеет противоположное направление, так как эдс E_2 направлена встречно по отношению к эдс E_1 и E_3 . Следовательно, ток в цепи равен:

$$I = I_1 - I_2 + I_3 = E_1/R - E_2/R + E_3/R = \frac{E_1 - E_2 + E_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}.$$

Напряжение на любом участке цепи, например между точками a и b , равно $U_{ab} = IR_4$.

При расчете сложных цепей для определения токов во всех ветвях цепи необходимо знать сопротивления ветвей, а также значение и направление всех эдс.

Перед составлением уравнений по законам Кирхгофа следует произвольно задаться направлениями токов в ветвях, показав их на схеме стрелками. Если действительное направление тока в какой-либо ветви противоположно выбранному, то после решения уравнений этот ток получится со знаком минус. Число необходимых уравнений равно числу неизвестных токов, причем число уравнений по первому закону Кирхгофа должно быть на единицу меньше числа узлов цепи, остальные уравнения составляются по второму закону Кирхгофа, причем следует выбрать наиболее простые контуры и так, чтобы каждый из них содержал хотя бы одну ветвь, не входившую в ранее составленные уравнения.

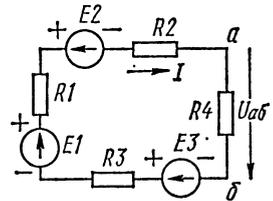


Рис. 20. Электрическая цепь с тремя источниками

Расчет сложной цепи с применением уравнений по законам К и р х г о ф а рассмотрим на примере двух параллельно включенных источников, замкнутых на сопротивление (см. рис. 19). Пусть эдс источников $E_1 = E_2 = 120$ В, их внутренние сопротивления $R_1 = 3$ Ом и $R_2 = 6$ Ом, сопротивление нагрузки $R = 18$ Ом.

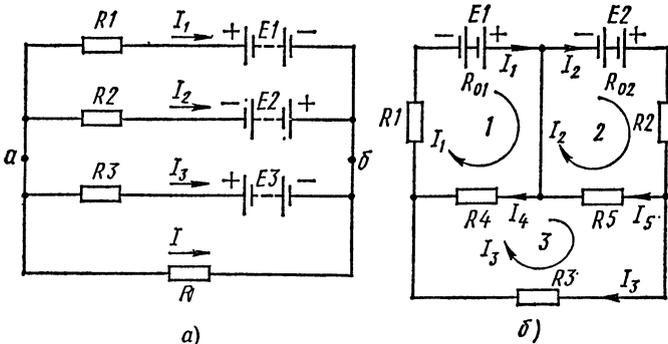


Рис. 21. К расчету сложной электрической цепи:

a — по методу узловых напряжений, b — по методу контурных токов

Так как число неизвестных токов три, то необходимо составить три уравнения. При двух узловых точках необходимо одно узловое уравнение по первому закону Кирхгофа: $I = I_1 + I_2$. Второе уравнение напишем при обходе контура, состоящего из первого источника и сопротивления нагрузки: $E_1 = I_1 R_1 + IR$. Аналогично третье уравнение запишем: $E_2 = I_2 R_2 + IR$. Подставляя численные значения, получим: $120 = 3 I_1 + 18 I$ и $120 = 6 I_2 + 18 I$. Так как $E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2 = 3 I_1 - 6 I_2 = 0$, то $I_1 = 2 I_2$ и $I = 3 I_2$. Подставляя эти значения в выра-

жение для эдс E_1 , получим: $120 = 2 \cdot I_2 \cdot 3 + 18 \cdot 3 I_2 = 60 I_2$, откуда $I_2 = \frac{120}{60} = 2A$, $I_1 = 2 I_2 = 4A$, $I = I_1 + I_2 = 6A$.

Часто используют метод узлового напряжения, который удобно применять к сложным электрическим цепям, имеющим две узловые точки a и b (рис. 21, a), и состоящим из нескольких параллельно соединенных источников энергии, работающих на общее сопротивление. Обозначив потенциалы в узловых точках φ_a и φ_b , напряжение между этими точками U можно выразить разностью этих потенциалов, т. е. $U = \varphi_a - \varphi_b$.

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

$$I_1 = \frac{\varphi_a - \varphi_b - E_1}{R_1} = (U - E_1) g_1; \quad I_2 = \frac{\varphi_a - \varphi_b + E_2}{R_2} = (U + E_2) g_2;$$

$$I_3 = \frac{\varphi_a - \varphi_b - E_3}{R_3} = (U - E_3) g_3; \quad I = \frac{\varphi_a - \varphi_b}{R} = Ug.$$

На основании первого закона Кирхгофа для узловой точки имеем: $I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0$. Подставив в эту сумму значения токов, найдем:

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

откуда

$$U = \frac{E_1 g_1 - E_2 g_2 + E_3 g_3}{g_1 + g_2 + g_3 + g} = \frac{\Sigma E g}{\Sigma g},$$

т. е. узловое напряжение равно алгебраической сумме произведений эдс и проводимостей всех параллельных ветвей, деленной на сумму проводимостей всех ветвей. Вычислив по этой формуле узловое напряжение и воспользовавшись выражениями для токов в ветвях, легко определить эти токи.

Для определения токов в сложных цепях, содержащих несколько контуров и эдс, применяют метод контурных токов. Предполагают, что в ветвях, входящих в состав двух смежных контуров, протекают два контурных тока, из которых первый представляет собой ток одного из смежных контуров, а второй — другого контура. Действительный ток в рассматриваемом участке цепи определяется суммой или разностью этих двух токов в зависимости от их взаимного относительного направления.

При использовании метода контурных токов составляют уравнения, исходя из суммы сопротивлений, входящих в состав данного контура, и суммы сопротивлений, входящих в состав ветви, общей для смежных контуров. Первую сумму условно обозначают двойным индексом, например $R_{11} R_{22}$ и т. д., а вторую сумму — индексом, содержащим номера контуров, для которых данный участок цепи является общим, например R_{12} , R_{13} и т. д.

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

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

В этом уравнении знак «+» или «—» берется в зависимости от взаимного относительного направления эдс и токов в контуре (при одинаковом направлении — плюс, при противоположном — минус).

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

На рис. 21, б изображена сложная электрическая цепь, содержащая три контура. В цепи два источника с эдс $E_1=12$ В, $E_2=8$ В и внутренним сопротивлением $R_{01}=4$ Ом, $R_{02}=3$ Ом и пять сопротивлений $R_1=20$ Ом, $R_2=29$ Ом, $R_3=40$ Ом, $R_4=8$ Ом, $R_5=16$ Ом.

Находим сопротивления: $R_{11}=R_1+R_{01}+R_4=20+4+8=32$ Ом; $R_{22}=R_2+R_{02}+R_5=29+3+16=48$ Ом; $R_{33}=R_3+R_4+R_5=40+8+16=64$ Ом; $R_{13}=R_{31}=R_4=8$ Ом; $R_{23}=R_{32}=R_5=16$ Ом.

Составляем уравнения:

для контура 1: $E_1=I_1R_{11}-I_3R_{13}$; $12=32I_1-8I_3$;

для контура 2: $E_2=I_2R_{22}-I_3R_{23}$; $8=48I_2-16I_3$;

для контура 3: $E_3=I_3R_{33}-I_1R_{31}-I_2R_{32}$; $0=64I_3-16I_2-8I_1$.

Решая эти уравнения, находим: $I_1=0,4$ А; $I_2=0,2$ А; $I_3=0,1$ А; $I_4=I_1-I_3=0,3$ А; $I_5=I_2-I_3=0,1$ А.

§ 18. Работа и мощность электрического тока

Способность тела производить работу называется **энергией** этого тела. Например, поднятый на высоту какой-либо груз обладает некоторым запасом энергии и при падении производит работу. Энергия тела тем больше, чем большую работу может произвести это тело при своем движении. Энергия не исчезает, а переходит из одной формы в другую.

Для переноса зарядов в замкнутой цепи источник электрической энергии затрачивает известную энергию, равную произведению эдс источника на количество электричества, перенесенного через эту цепь, т. е. EQ .

Однако не вся эта энергия является полезной, т. е. не вся работа, произведенная источником энергии, сообщается приемнику энергии, так как часть ее расходуется на преодоление внутреннего сопротивления источника и проводов. Таким образом, источник энергии производит полезную работу, равную $A=UQ$, где U — напряжение на зажимах приемника.

Так как количество электричества равно произведению силы тока в цепи на время его прохождения $Q=It$, формулу работы можно представить в следующем виде:

$$A=UIt,$$

т. е. электрическая энергия, или работа, есть произведение напряжения, тока в цепи и времени его прохождения.

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

работы можно записать и таким образом:

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

М о щ н о с т ь ю называется работа, производимая (или потребляемая) в одну секунду. Мощность выражается следующими формулами:

$$P = A/t = UQ/t = UI = I^2 R = U^2/R.$$

Если в формулах работы и мощности напряжение выражено в вольтах, ток — в амперах, сопротивление — в омах и время — в секундах, то работа измеряется в ньютон-метрах или в ватт-секундах (Вт·с), т. е. в джоулях (Дж), а мощность — в ваттах (Вт). Для измерения малых мощностей применяют единицу, в тысячу раз меньшую одного ватта, называемую милливаттом (мВт); 1 Вт = 1000 мВт, а для выражения больших мощностей — единицу, в тысячу раз большую ватта, называемую киловаттом (кВт); 1 кВт = 1000 Вт. Так как джоуль является малой единицей, то работа обычно выражается в более крупных единицах: ватт-часах (Вт·ч), гектоватт-часах (гВт·ч) и киловатт-часах (кВт·ч). Соотношение между этими единицами и джоулем следующее: 1 Вт·ч = = 3600 Дж; 1 гВт·ч = 100 Вт·ч; 1 кВт·ч = 1000 Вт·ч.

При очень малом внешнем сопротивлении R сила тока в цепи велика, а напряжение на зажимах генератора при этом мало. При сопротивлении внешней цепи R , равном нулю, напряжение на зажимах генератора U также равно нулю. Следовательно, и мощность P , потребляемая внешней цепью, равна нулю.

При очень большом внешнем сопротивлении (когда внешняя цепь разомкнута, сопротивление ее составляет бесконечно большую величину) сила тока в цепи равна нулю. Мощность, отдаваемая во внешнюю цепь, в этом случае равна нулю.

Для получения наибольшей мощности во внешней цепи сопротивление последней должно быть равно внутреннему сопротивлению генератора. Однако надо иметь в виду, что при равенстве внутреннего сопротивления генератора сопротивлению внешней цепи полезное действие генератора невелико и работа его в таких условиях неэкономична, так как половина всей мощности, развиваемой генератором, расходуется на его внутреннее сопротивление.

§ 19. Закон Ленца — Джоуля

При прохождении электрического тока через металлический проводник электроны сталкиваются то с нейтральными молекулами, то с молекулами, потерявшими электроны. Движущийся электрон либо отщепляет от нейтральной молекулы новый электрон, теряя свою кинетическую энергию и образуя новый положительный ион, либо соединяется с молекулой, потерявшей электрон (с положительным ионом), образуя нейтральную молекулу. При столкновении электронов с молекулами расходуется энергия, которая превращается в тепло. Любое движение, при котором преодолевается сопротивление, требует затраты определенной энергии. Так, например, для перемещения какого-либо тела преодолевается сопротивление трения, и работа, затраченная

на это, превращается в тепло. Электрическое сопротивление проводника играет ту же роль, что и сопротивление трения. Таким образом, для проведения тока через проводник источник тока затрачивает некоторую энергию, которая превращается в тепло. Переход электрической энергии в тепловую отражает закон Ленца — Джоуля или закон теплового действия тока.

Русский ученый Ленц и английский физик Джоуль одновременно и независимо один от другого установили, что *при прохождении электрического тока по проводнику количество теплоты, выделяемое в проводнике, прямо пропорционально квадрату тока, сопротивлению проводника и времени, в течение которого электрический ток протекал по проводнику*. Это положение называется **законом Ленца — Джоуля**.

Если обозначить количество теплоты, создаваемое током, буквой Q (Дж), силу тока, протекающего по проводнику, — I , сопротивление проводника — R и время, в течение которого ток протекал по проводнику, — t , то закону Ленца — Джоуля можно придать следующее выражение: $Q = I^2 R t$. Так как $I = U/R$ и $R = U/I$, то $Q = \frac{U^2}{R} t = U I t$.

§ 20. Нагревание проводников электрическим током. Расчет сечения проводов

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

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

Материалом для изготовления нити накала осветительных ламп служит вольфрам (с примесью оксида тория и других элементов). Этот металл обладает высокой температурой плавления (3660°) и большой механической прочностью.

Электрическое нагревание проводников не всегда оказывает полезное влияние. В проводах линий электропередач вследствие сильного нагрева их при больших токах может создаваться опасность возникновения пожаров. Во избежание чрезмерного нагрева линейных проводов, а также различных обмоток электрических машин и аппаратов из изолированной проволоки для электрической аппаратуры установлены нормы максимальных значений сил токов, пропускаемых по данному проводу или обмотке.

Ток, при котором устанавливается наибольшая допустимая температура провода, называется **до п у с т и м ы м т о к о м**. Наибольшая допустимая температура зависит от изоляции провода и способа его прокладки.

Расчет проводов по формулам, основанным на законах нагрева, очень сложен. На практике допустимое для данной силы тока сечение провода определяется по таблицам допустимых длительных токовых нагрузок на провода и кабели, приведенным в Правилах устройства электроустановок (ПУЭ), например в табл. 2.

Таблица 2. Допустимые токовые нагрузки для изолированных проводов

Поперечное сечение провода, мм ²	Допустимый ток в проводах, А	
	медных	алюминиевых
0,5	11	—
1	17	—
2,5	30	24
4	41	32
6	50	36
10	80	55
25	140	105
50	215	165

Провод выбирается такого сечения, чтобы допустимый ток его был равен или больше заданного или расчетного тока.

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

Сопротивление проводов сечением S из материала с удельным сопротивлением ρ равно $R = \rho \frac{2l}{S}$, а падение напряжения в проводах

$\Delta U = IR = I\rho \frac{2l}{S}$. Таким образом, напряжение на зажимах потребителя U_n окажется меньше напряжения в начале линии (источника) U_n . Разность напряжений в начале и в конце линии, равная падению напряжения в проводах, называется потерей напряжения: $U_n - U_n = \Delta U = IR$.

Любой приемник энергии очень чувствителен к изменениям напряжения, т. е. отклонениям его от номинального значения. Так, например, яркость лампы накаливания примерно пропорциональна четвертой степени напряжения, т. е. при понижении напряжения на 5% световой поток лампы накаливания уменьшается на 18,5%, а при повышении напряжения на 5% сверх номинального сокращает срок службы ее вдвое.

Колебания напряжения для осветительной нагрузки не должны превышать $-2,5 + 5\%$, а для силовой ± 5 и иногда $+10\%$ номинального значения. Следовательно, допускаемая потеря напряжения в линии не должна превышать тех же значений.

Задача расчета сводится к выбору такого сечения провода, при котором обеспечивается нормальное рабочее напряжение на зажимах потребителей электрической энергии, т. е. необходимое сечение проводов линии

$$S = 2\rho l I / \Delta U.$$

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

Для относительно коротких линий (осветительные сети промышленных предприятий, общественных и жилых зданий) сечение проводов

выбирают в зависимости от допустимого нагрева, так как потеря напряжения обычно оказывается меньше допустимой.

Мощность потерь в линии электропередачи равна:

$$\Delta P = \Delta UI = I^2 R.$$

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

§ 21. Химическое действие электрического тока

Растворы солей и кислот в воде или в каком-либо другом растворителе проводят электрический ток и называются э л е к т р о л и т а м и или п р о в о д н и к а м и в т о р о г о р о д а в отличие от м е т а л л и ч е с к и х п р о в о д н и к о в, называемых п р о в о д н и к а м и п е р в о г о р о д а.

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

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

Если в сосуд с электролитом погружены две металлические пластины, называемые э л е к т р о д а м и, которые при помощи проводочных проводников присоединены к источнику энергии постоянного тока, то вследствие разности потенциалов между электродами через электролит будет протекать ток. Прохождение тока через электролит сопровождается химическим процессом, называемым э л е к т р о л и з о м. Находящиеся в электролите ионы, притягиваясь к электродам, двигаются в противоположных направлениях: положительные ионы — к катоду, а отрицательные ионы — к аноду. Подойдя к катоду, положительные ионы получают от него недостающие им электроны и образуют электрически нейтральные атомы. На аноде происходит обратный процесс: отрицательные ионы отдают аноду свои избыточные электроны.

При прохождении электрического тока через электролит на электродах выделяется определенное количество веществ, содержащихся в виде химического соединения в электролите. Зависимость выделенного вещества от силы тока устанавливается двумя законами Фарадея.

Первый закон Фарадея сформулирован так: *количество вещества, выделившегося на электродах при прохождении тока через электролит, прямо пропорционально количеству электричества, прошедшему через электролит.* При прохождении одного кулона электричества из электролита выделяется определенное количество массы вещества, которое называется э л е к т р о х и м и ч е с к и м э к в и в а л е н т о м данного вещества.

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

как один кулон равен ампер-секунде, то между ампер-часом и кулоном имеет место следующее соотношение: $1 \text{ А} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ А} \cdot \text{с} = 3600 \text{ Кл}$.

Электрохимический эквивалент K выражается в граммах, отнесенных к одному ампер-часу количества электричества (г/А·ч), т. е. это количество массы вещества, выделившегося из электролита и выраженное в граммах, при прохождении через электролит одного ампер-часа количества электричества.

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

Из сопоставления 1-го и 2-го законов Фарадея вытекает, что электрохимические эквиваленты K пропорциональны их химическим эквивалентам, т. е. $K_1/a_1 = K_2/a_2 = K_3/a_3 = \dots$.

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

$$K/a = 3,72 \cdot 10^{-2} = 0,0372 = \frac{1}{26,8}.$$

Итак, второй закон Фарадея может быть выражен следующим образом.

$$K = \frac{a}{26,8}.$$

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

§ 22. Гальванические элементы

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

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

Простейшим гальваническим элементом является медно-цинковый. В стеклянный сосуд, наполненный раствором серной кислоты в воде, погружены медная и цинковая пластины, которые представляют собой положительный и отрицательный полюсы элемента.

При замыкании цепи элемента каким-либо проводником внутри этого элемента будет проходить ток от цинковой отрицательной пластины к медной положительной, а во внешней цепи — от медной к цинковой. Под действием тока внутри элемента положительные ионы водорода движутся по направлению тока, отрицательные ионы кислотного остатка — в противоположном направлении. Соприкасаясь с медной пластиной, положительные ионы водорода отдают ей свои заряды, а водород в виде пузырьков газа скопляется на ее поверхности. В это же время отрицательные ионы остатка серной кислоты отдают свои

заряды цинковой пластине. Таким образом происходит непрерывный заряд пластин элемента, поддерживающий разность потенциалов (напряжение) на его зажимах.

Выделение водорода на медной пластине элемента ослабляет его действие — поляризует элемент. Явление поляризации состоит в том, что скопляющийся на положительном электроде водород создает в совокупности с металлом электрода дополнительную разность потенциалов, называемую электродвижущей силой поляризации. Эта эдс направлена противоположно электродвижущей силе элемента. Кроме того, пузырьки водорода, покрывающие часть медной пластины, уменьшают ее действующую поверхность, а это увеличивает внутреннее сопротивление элемента.

Поляризация в рассмотренном элементе настолько значительна, что делает его непригодным для практических целей. Для устранения явления поляризации в состав элемента вводят поглотитель, носящий название депполяризатора, который предназначен для поглощения водорода и не допускает скопления его на положительном полюсе элемента. Депполяризаторами могут служить химические препараты, богатые кислородом или хлором.

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

В угольно-цинковом элементе положительным полюсом служит угольная пластина, а отрицательным — цинковый стержень. Депполяризатором в этом элементе является спрессованная под большим давлением смесь, называемая агломератом. Она состоит из перекиси марганца и графита. В качестве электролита в угольно-цинковом элементе применяют водный раствор хлористого аммония. Электродвижущая сила угольно-цинкового элемента 1,4—1,5 В в начале разряда при среднем значении 0,9—1,1 В, а внутреннее сопротивление в зависимости от конструкции элемента — 0,25—0,7 Ом в начале разряда и 1,4—5 Ом в конце.

Угольно-цинковые элементы выпускает отечественная промышленность в виде так называемых сухих элементов стаканчикового и галетного типов, весьма удобных для переноски и перевозки.

В сухих элементах стаканчикового типа (рис. 22) положительный полюс 8 с агломератом 2 помещают внутри цинковой коробки 9, которая служит отрицательным полюсом элемента. Пространство между стенками цинковой коробки и агломератом заполняют пастой 1, состоящей из раствора хлористого аммония и картофельной муки. Над агломератом укладывают картонную прокладку 3, на которую насыпают прослойку 4 из опилок; сверху опилки закрывают прокладкой 5.

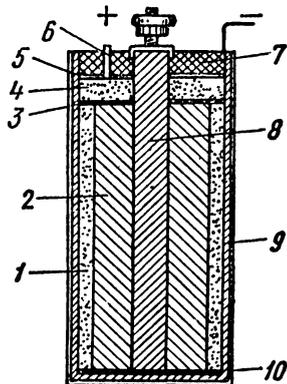


Рис. 22. Сухой гальванический элемент:

1 — паста, 2 — агломерат, 3, 5, 10 — картонные прокладки, 4 — прослойка, 6 — трубка, 7 — смола, 8 — положительный полюс, 9 — цинковая коробка

Затем элемент заливают смолой 7, в которую вставляют трубку 6. Назначение этой трубки — удалять образующиеся внутри элемента газы.

На выходящий из смолы угольный электрод насаживают медный колпачок с винтом и гайкой для присоединения проводника. К верхней части цинковой коробки (отрицательному полюсу) припаивают изолированный гибкий проводник. На дно коробки укладывают изолирующую прокладку 10.

В галетном элементе отрицательным электродом является цинковая пластина, положительным — спрессованный в виде галеты порошок двуокиси марганца с углем. Между электродами помещают картонную пластинку, пропитанную раствором нашатырного спирта. Наружная поверхность цинковой пластины покрыта слоем канифоли с частицами графита для электропроводности.

В качестве изоляции применяют хлорвиниловые пленки. Галетные элементы компактны и их активные материалы (особенно цинк) используются лучше, чем в стаканчиковых элементах.

§ 23. Аккумуляторы

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

В аккумуляторе, как и в гальваническом элементе, электрический ток является следствием химических процессов. Но в отличие от аккумулятора в гальваническом элементе получающиеся химические соединения не могут быть вторично разложены и приведены в первоначальное состояние током постороннего источника. Поэтому гальванические элементы называются первичными, а аккумуляторы — вторичными или обратимыми. Повторные заряд и разряд не только не вредят аккумулятору, но даже улучшают его свойства, так как в работе участвуют все более глубокие слои пластин электродов.

В зависимости от состава электролита аккумуляторы могут быть кислотными и щелочными. Простейший кислотный аккумулятор состоит из двух свинцовых пластин (электродов), погруженных в электролит, которым служит вода с небольшим добавлением серной кислоты.

Постоянный ток постороннего источника, проходя через электролит, разлагает его на составные части. Внутри электролита возникает движение положительных ионов водорода H_2 к пластине, соединенной с отрицательным зажимом источника тока, и отрицательных ионов кислорода O к пластине, соединенной с положительным зажимом источника тока. В результате электролиза окисляется свинец на положительном электроде и образуется губчатый свинец на отрицательном электроде.

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

Электролитом в кислотных аккумуляторах, как указывалось выше, служит раствор кислоты определенной плотности. Плотность раствора называется число, показывающее, во сколько раз масса этого раствора больше массы воды того же объема.

Для наполнения стационарных аккумуляторов употребляют раствор серной кислоты плотностью 1,21 при 15°C.

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

ЭДС аккумулятора зависит от плотности электролита и не зависит от его размеров и номинальной емкости.

В процессе заряда и разряда аккумулятора плотность электролита не остается постоянной, в связи с этим изменяется как его ЭДС, так и напряжение на его зажимах (рис. 23).

Количество электричества, которое аккумулятор может отдать при разряде определенным током до наименьшего допустимого напряжения, называется его емкостью. Она равна произведению разрядного тока в амперах на продолжительность времени разряда в часах и выражается в ампер-часах.

Емкость аккумулятора зависит от количества активной массы, величины тока и температуры. Под номинальной емкостью понимают то количество электричества, которое отдает полностью заряженный аккумулятор при 10-часовом режиме разряда и температуре 25°C. Таким образом, аккумулятор отдает номинальную емкость, разряжаясь в течение 10 ч током, численно равным 0,1 величины его номинальной емкости. При увеличении разрядного тока емкость аккумулятора уменьшается, так как поверхность пластин покрывается сернокислым свинцом и затрудняет доступ электролита к внутренним слоям активной массы. При понижении температуры увеличивается вязкость электролита, что также затрудняет его доступ к внутренним слоям активной массы и уменьшает емкость аккумулятора.

Для увеличения емкости аккумулятора несколько одноименных пластин соединяют параллельно (рис. 24). Каждая группа положительных и отрицательных пластин работает как одна большая пластина, площадь которой равна сумме площадей параллельно соединенных

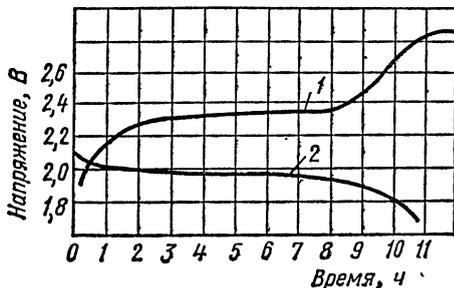


Рис. 23. График изменения напряжения кислотного аккумулятора:

1 — при заряде, 2 — при разряде

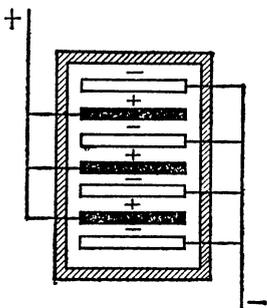


Рис. 24. Схема соединения пластин кислотного аккумулятора

пластин. Так как положительные пластины должны находиться между отрицательными, число отрицательных пластин всегда на одну больше числа положительных. При этом условии обе стороны положительных пластин вступают во взаимодействие с электролитом (при односторонней работе положительные пластины коробятся и при соприкосновении с отрицательными пластинами может произойти короткое замыкание).

Стационарные кислотные аккумуляторы изготовляют в стеклянных или керамических сосудах. Аккумуляторы больших емкостей имеют сосуды деревянные, выложенные внутри свинцом или кислотостойким изоляционным материалом. Кислотные аккумуляторы применяют на электротехнических установках стационарного типа и на автотранспорте. В качестве переносных аккумуляторов используют преимущественно щелочные аккумуляторы.

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

Эдс щелочных аккумуляторов зависит от состояния активной массы пластин. От температуры и плотности электролита эдс зависит незначительно и только при низких температурах, близких к нулю, она резко изменяется. Напряжение в конце заряда аккумулятора равно 1,8 В, по окончании заряда — 1,5—1,55 В; эдс разряженного аккумулятора — 1,3 В.

Достоинством щелочных аккумуляторов является то, что они не требуют тщательного ухода, не боятся сотрясений, могут длительно оставаться в разреженном состоянии, выносят короткие замыкания, которые для кислотных аккумуляторов представляют большую опасность. Саморазряд у щелочных аккумуляторов меньше, чем у кислотных.

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

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

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

Наиболее широкое распространение получили кадмиево-никелевые (КН) и железо-никелевые (ЖН) аккумуляторы, электролитом которых служит раствор едкого кали в воде; плотность электролита 1,2.

По своему устройству и электрическим данным аккумуляторы КН и ЖН незначительно отличаются друг от друга. Активную массу запрессовывают в брикеты (пакеты), а затем из брикетов собирают отдельные пластины. У аккумуляторов типа ЖН отрицательных пластин на одну больше, чем положительных. У аккумуляторов типа КН положительных пластин на одну больше, чем отрицательных. Один из полюсов аккумулятора соединяется с сосудом (у ЖН — отрицательный, а у КН — положительный полюс).

Серебряно-цинковый аккумулятор представляет собой пластмассовый сосуд, в котором помещены положительные и отрицательные

электроды, составленные из отдельных пластин. Отрицательные электроды, изготовленные из пластин окиси цинка, заключены в защитные пакеты из материала, который хорошо пропускает электролит, но задерживает металлические частицы. Положительные пластины изготовлены из серебра.

Для составления аккумуляторной батареи или батареи гальванических элементов несколько элементов соединяют последовательно, т. е. катод первого аккумулятора соединяют с анодом второго, катод второго — с анодом третьего и т. д. Получившиеся таким образом свободные электроды, а именно, анод первого элемента и катод последнего являются соответственно положительным и отрицательным полюсами аккумуляторной батареи. При определении эдс аккумуляторной батареи из n кислотных аккумуляторов или гальванических элементов с эдс одного элемента E_0 и внутренним сопротивлением R_0 эдс батареи $E = nE_0$, и внутреннее сопротивление $R = nR_0$.

Последовательное соединение элементов используется для увеличения напряжения.

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

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

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

§ 24. Нелинейные сопротивления

Цепь, сопротивление которой не зависит от проходящего по ней тока, называется л и н е й н о й. Если же сопротивление зависит от проходящего тока, то и цепь называется н е л и н е й н о й.

Расчет токов и напряжений в нелинейных цепях производится с помощью вольтамперных характеристик нелинейных сопротивлений, содержащихся в рассчитываемых цепях. Вольтамперная характеристика, представляющая собой зависимость между током и приложенным к нелинейному сопротивлению напряжением, изображается графиком, построенным на основании экспериментальных данных (рис. 25).

Для линейного элемента вольтамперная характеристика (рис. 25, а) представляет собой прямую 1, так как сопротивление постоянно и согласно закону Ома между током и напряжением существует прямо пропорциональная зависимость. Для нелинейного элемента вольтамперная характеристика не прямолинейна и имеет вид либо кривой 2, если его сопротивление уменьшается с ростом тока (например, в электронных приборах: электронные лампы, полупроводниковые диоды и стабилитроны), либо кривой 3, если сопротивление элемента растет с увеличением тока (например, нагревательные приборы, лампа накаливания, бареттеры).

При последовательном соединении двух нелинейных сопротивлений $R1$ и $R2$ с вольтамперными характеристиками 1 и 2 (рис. 25, б) ток в цепи I является общим для обоих сопротивлений, а приложенное напряжение U в любой момент равно сумме напряжений на первом U_1 и втором U_2 нелинейном сопротивлении, т. е. $U=U_1+U_2$. Зада-

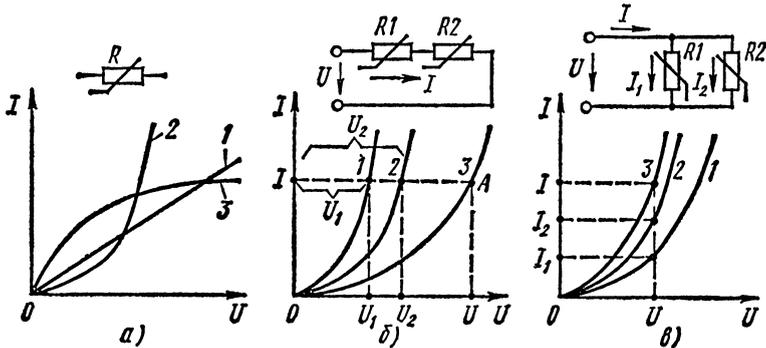


Рис. 25. Вольтамперные характеристики и условные обозначения нелинейных сопротивлений:

a — для различных типов сопротивлений, $б$ — для двух последовательно включенных сопротивлений, $в$ — для двух параллельно включенных сопротивлений

ваясь различными значениями тока и определяя по кривым 1 и 2 соответствующие им значения напряжений U_1 и U_2 , после их суммирования находим значения напряжения U , соответствующие этим же значениям тока.

Таким образом можно построить вольтамперную характеристику 3 для всей цепи.

Если известно приложенное напряжение U и требуется определить как ток в цепи, так и напряжение на каждом нелинейном сопротивлении, то на горизонтальной оси следует отложить это напряжение и восстановить перпендикуляр до пересечения с кривой 3 в точке A . Эта точка определит ток в цепи I , а отрезки на прямой, параллельной горизонтальной оси, от оси токов до пересечения с кривой 1 и кривой 2 будут соответствовать напряжениям на сопротивлениях $R1$ и $R2$.

При параллельном соединении нелинейных сопротивлений $R1$ и $R2$ с вольтамперными характеристиками 1 и 2 (рис. 25, в) ток в неразветвленной цепи в любой момент равен сумме токов в этих сопротивлениях ($I=I_1+I_2$), а напряжение на зажимах цепи U является общим для обоих сопротивлений. Откладывая на горизонтальной оси значение напряжения источника энергии U и восстанавливая перпендикуляр до пересечения с кривыми 1 и 2 , найдем значения токов I_1 и I_2 соответственно, а их сумма определит ток в неразветвленной части цепи.

Рассмотренный метод расчета нелинейных цепей применим к любому числу последовательно или параллельно соединенных нелинейных сопротивлений. Расчет при смешанном соединении нелинейных сопротивлений производится так же, как линейных цепей, т. е. сначала

находят сопротивление параллельно или последовательно соединенных нелинейных сопротивлений, заменяя их одним общим.

Контрольные вопросы

1. В каких единицах измеряют эдс, напряжение и ток?
2. От чего зависит сопротивление металлического проводника?
3. Сформулируйте закон Ома для замкнутой электрической цепи и для ее участка.
4. Каково соотношение между эдс и напряжением на зажимах источника энергии?
5. Чему равен ток при коротком замыкании зажимов источника энергии?
6. Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа.
7. Как измеряют общее сопротивление при последовательном, параллельном и смешанном соединениях потребителей энергии?
8. Как определить напряжение на зажимах двух параллельно соединенных источников энергии с различными эдс, замкнутых на какой-либо потребитель энергии?
9. В чем заключается метод наложения?
10. Объясните метод контурных токов.
11. Чему равна работа и мощность электрического тока и в каких единицах они измеряются?
12. Сформулируйте закон Ленца — Джоуля.
13. Как устроен кислотный аккумулятор?

Глава III

МАГНЕТИЗМ И ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

§ 25. Магниты и их свойства

Магнетизм — это особое проявление движения электрических зарядов внутри атомов и молекул, которое проявляется в том, что некоторые тела способны притягивать к себе и удерживать частицы железа, никеля и других металлов. Эти тела называются магнитными.

Стрелка компаса, являющаяся магнитом, устанавливается в магнитном поле Земли так, что один конец ее указывает направление на север и называется **северным полюсом** (N), а противоположный конец — **южным полюсом** (S).

В зависимости от назначения магнитам придают различную форму: прямоугольную, ромбическую, круглую и т. д. Магнит любой формы имеет два полюса — северный и южный.

Если намагниченный стержень погрузить в железные опилки и затем вынуть, то наибольшее количество опилок окажется притянутым к концам магнита, а в средней части, называемой **нейтральной линией**, опилок не будет. Если намагниченный стержень разделить на две части, то образуются два магнита с двумя разноименными полюсами на концах. При дальнейшем дроблении на части намагниченного стержня будут получаться отдельные магниты с северным и южным полюсами на концах. Таким образом, получить магнит с каким-либо одним полюсом (N или S) невозможно.

Если недалеко от северного N (или южного S) полюса какого-либо магнита поместить стальной брусок, он приобретает свойство притягивать железные предметы, причем ближайший к полюсу N магнита конец бруска будет южным полюсом S , а противоположный — северным N .

При расположении двух магнитов на некотором расстоянии один от другого между их полюсами возникает сила взаимодействия, направленная так, что одноименные полюсы взаимно отталкиваются, а разноименные притягиваются.

Вокруг всякого намагниченного тела возникает магнитное поле, являющееся материальной средой, в которой обнаруживается действие магнитных сил. На рисунках магнитное поле изображается в виде магнитных линий, направленных от северного полюса к южному (рис. 26). Любая магнитная линия не имеет ни конца, ни начала и представляет собой замкнутую кривую, так как северный и южный полюсы магнита неотделимы один от другого.

При внесении в магнитное поле какого-либо тела оно пронизывается магнитными линиями, которые определенным образом воздействуют на поле. При этом различные материалы по-разному воздейству-

ют на магнитное поле. В намагниченных телах магнитное поле создается при движении электронов, вращающихся вокруг ядра атома и вокруг собственной оси. Орбиты и оси вращения электронов в атомах могут находиться в различных положениях один относительно другого, так что в различных положениях находятся магнитные поля, возбуждаемые движущимися электронами. В зависимости от взаимного расположения магнитных полей они могут складываться или вычитаться. В первом случае атом будет обладать магнитным полем или магнитным моментом, а во втором — не будет. Материалы, атомы которых не имеют магнитного момента и намагнитить которые невозможно, называются **д и а м а г н и т н ы м и**. К ним относятся абсолютное большинство веществ, встречающихся в природе, и некоторые металлы (медь, свинец, цинк, серебро и другие).

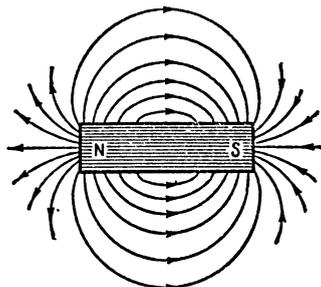


Рис. 26. Магнитное поле постоянного магнита

Материалы, атомы которых обладают некоторым магнитным моментом и могут намагничиваться, называются **п а р а м а г н и т н ы м и**. К ним относятся алюминий, олово, марганец и др. Исключение составляют **ф е р р о м а г н и т н ы е** материалы, атомы которых обладают большим магнитным моментом и которые легко поддаются намагничиванию. К таким материалам относятся железо, сталь, чугун, никель, кобальт, гадолиний и их сплавы.

§ 26. Магнитное поле электрического тока

Вокруг проводника с током образуется магнитное поле, так что свободно вращающаяся магнитная стрелка, помещенная вблизи проводника, будет стремиться занять положение, перпендикулярное плоскости, проходящей вдоль него. В этом легко убедиться, проделав следующий опыт. В отверстие горизонтально положенного листа картона вставляют прямолинейный проводник и пропускают через него ток. Насыпают на картон железные опилки и убеждаются в том, что они располагаются концентрическими окружностями, имеющими общий центр в точке пересечения проводником картонного листа (рис. 27, а). Магнитная стрелка, подвешенная на нити вблизи этого проводника, займет положение, указанное на рисунке. При изменении направления тока в проводнике магнитная стрелка повернется на угол 180° , оставаясь в положении, перпендикулярном плоскости, проходящей вдоль проводника. В зависимости от направления тока в проводнике направление магнитных линий образуемого им магнитного поля определяется **правилом буравчика**, которое формулируется следующим образом: *если поступательное движение буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то вращательное движение его рукоятки указывает направление магнитных линий поля, образующегося вокруг этого проводника.*

Если по проволоке, согнутой в виде кольца, пропустить ток, то под действием его также возникнет магнитное поле. Проволока, согнутая спирально и состоящая из нескольких витков, расположенных так, что оси их совпадают (рис. 27, б), называется с о л е н о и д о м. При прохождении тока через обмотку соленоида или один виток про-

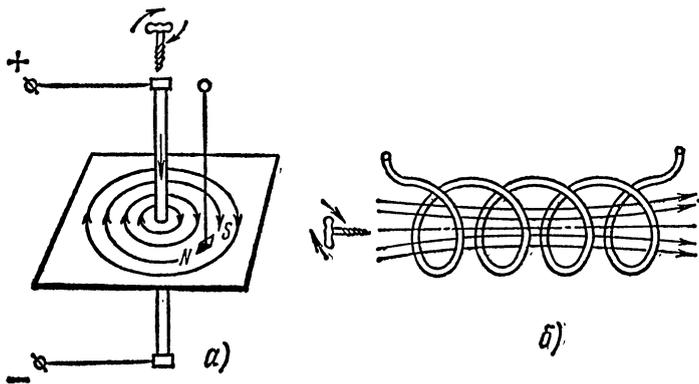


Рис. 27. Магнитное поле:
а — прямого проводника с током, б — соленоида

волоки возбуждается магнитное поле. Направление этого поля также определяется правилом буравчика. Если расположить ось буравчика перпендикулярно плоскости кольцевого проводника или вдоль оси соленоида и вращать его рукоятку по направлению тока, то поступательное движение этого буравчика укажет направление магнитных линий поля кольца или соленоида.

Магнитное поле, возбужденное током обмотки соленоида, подобно магнитному полю постоянного магнита, т. е. конец соленоида, из которого выходят магнитные линии, является его северным полюсом, а противоположный конец — южным.

Направление магнитного поля зависит от направления тока и при изменении направления тока в прямолинейном проводнике или в катушке изменится также направление магнитных линий поля, возбуждаемого этим током.

В однородном магнитном поле во всех точках поле имеет одинаковое направление и одинаковую интенсивность. В противном случае поле называется неоднородным. Графически однородное магнитное поле изображают параллельными линиями с одинаковой плотностью, например, в воздушном зазоре между двумя разноименными параллельно расположенными полюсами магнита.

§ 27. Проводник с током в магнитном поле. Магнитная индукция

Если проводник, по которому проходит электрический ток, внести в магнитное поле, то в результате взаимодействия магнитного поля и проводника с током проводник будет перемещаться в ту или иную

сторону. Направление перемещения проводника зависит от направления тока в нем и от направления магнитных линий поля.

Допустим, что в магнитном поле магнита NS (рис. 28, *а*) находится проводник, расположенный перпендикулярно плоскости рисунка; по проводнику протекает ток в направлении от нас за плоскость рисунка. Ток, идущий от плоскости рисунка к наблюдателю, обозначается условно точкой, а ток, направляющийся за плоскость рисунка

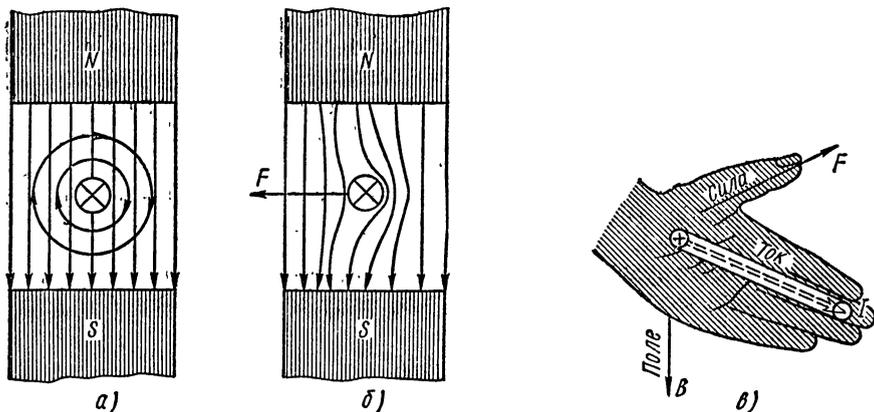


Рис. 28. Движение проводника с током в магнитном поле и правило левой руки:

а — магнитное поле полюсов и тока проводника, *б* — результирующее магнитное поле, *в* — правило левой руки

от наблюдателя, — крестом. Под действием тока вокруг проводника образуется свое магнитное поле. Применяя правило буравчика, легко убедиться, что в рассматриваемом нами случае направление магнитных линий этого поля совпадает с направлением движения часовой стрелки.

При взаимодействии магнитного поля магнита и поля, созданного током, образуется результирующее магнитное поле, изображенное на рис. 28, *б*. Густота магнитных линий результирующего поля с обеих сторон проводника различна. Справа от проводника магнитные поля, имея одинаковое направление, складываются, а слева, будучи направленными встречно, частично взаимно уничтожаются. Следовательно, на проводник будет действовать сила, большая справа и меньшая слева. Под действием большей силы проводник будет перемещаться по направлению силы F .

Перемена направления тока в проводнике изменит направление магнитных линий вокруг него, вследствие чего изменится и направление перемещения проводника.

Для определения направления движения проводника в магнитном поле можно пользоваться **правилом левой руки**, которое формулируется следующим образом: *если расположить левую руку так, чтобы магнитные линии пронизывали ладонь, а вытянутые четыре пальца ука-*

зывают направление тока в проводнике, то отогнутый большой палец укажет направление движения проводника (рис. 28, в).

Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, зависит как от тока в проводнике, так и от интенсивности магнитного поля.

Основной величиной, характеризующей интенсивность магнитного поля, является магнитная индукция B . Единицей измерения магнитной индукции является т е с л а ($\text{Тл} = \text{В} \cdot \text{с}/\text{м}^2$).

О магнитной индукции можно судить по силе действия магнитного поля на проводник с током, помещенный в это поле. Если на проводник длиной 1 м и с током 1 А , расположенный перпендикулярно магнитным линиям в равномерном магнитном поле, действует сила в 1 Н (ньютон), то магнитная индукция такого поля равна 1 Тл (тесла).

Магнитная индукция является векторной величиной, ее направление совпадает с направлением магнитных линий, причем в каждой точке поля вектор магнитной индукции направлен по касательной к магнитной линии.

Сила F , действующая на проводник с током в магнитном поле, пропорциональна магнитной индукции B , току в проводнике I и длине проводника l , т. е.

$$F = BIl.$$

Эта формула верна лишь в том случае, когда проводник с током расположен перпендикулярно магнитным линиям равномерного магнитного поля. Если проводник с током находится в магнитном поле под каким-либо углом α по отношению к магнитным линиям, то сила равна:

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

Если проводник расположить вдоль магнитных линий, то сила F станет равной нулю, так как $\alpha = 0$.

§ 28. Напряженность магнитного поля.

Закон полного тока

Свойство тока возбуждать магнитное поле характеризуется магнитодвижущей силой (мдс), обозначаемой буквой F . Магнитодвижущая сила распределяется вдоль замкнутой магнитной линии и равна току, создающему магнитное поле, и измеряется в амперах, как и ток. Намагничивающая сила прямолинейного проводника с током I равна этому току, т. е. $F = I$. Для возбуждения более сильного поля ток пропускают по катушке с числом витков ω и так как каждый виток катушки обладает намагничивающей силой I , то намагничивающая сила катушки $F = \omega I$ ампер (часто говорят «ампер-витков»).

Магнитодвижущая сила, приходящаяся на единицу длины магнитной линии, называется н а п р я ж е н н о с т ь ю магнитного поля, обозначается буквой $H = F/l$ (где l — длина магнитной линии), измеряется в амперах на метр (А/м) или чаще в единицах в 100 раз больших (А/см = 100 А/м).

Напряженность магнитного поля, так же как и магнитная индукция, является векторной величиной. В изотропной среде (с одинаковыми магнитными свойствами во всех направлениях) вектор напряженности магнитного поля совпадает с направлением магнитной линии в данной точке.

Если физические условия вдоль всей длины магнитной линии одинаковы, то определение напряженности поля очень просто. В частности, вокруг прямолинейного проводника линии магнитного поля представляют собой окружности (см. рис. 27, а), длина каждой из которых $l=2\pi x$, где x — радиус окружности с центром на оси проводника, проведенный через рассматриваемую точку поля. Условия во всех точках выбранной окружности одинаковы и напряженность поля $H=I/2\pi x$, т. е. по мере удаления от проводника напряженность поля уменьшается. Это выражение можно записать в виде $I=Hl=H 2\pi x$.

Если магнитное поле создано не одним, а ω проводниками с током I , то магнитодвижущая сила

$$\Sigma I = F = I\omega = Hl = H 2\pi x.$$

Таким образом, магнитодвижущая сила вдоль контура равна полному току, пронизывающему поверхность, ограниченную этим контуром. Полученное соотношение называется **з а к о н о м п о л н о г о т о к а**.

Если простейший контур длиной $l=2\pi x$ пронизывается n проводниками с токами I_1 одного направления и m проводниками с токами I_2 противоположного направления, то закон полного тока примет следующий вид:

$$F = nI_1 - mI_2 = Hl = H 2\pi x.$$

В большинстве электротехнических устройств напряженность магнитного поля вдоль магнитной линии изменяется в зависимости от материала и сечения участков, через которые она проходит. В этом случае магнитная линия делится на K участков, в пределах каждого из которых напряженность магнитного поля можно считать постоянной. Если магнитное поле возбуждается током I , проходящим по катушке с числом витков ω , то закон полного тока для таких устройств будет иметь следующую общую формулу:

$$\Sigma I = \omega I = H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_k l_k,$$

т. е. намагничивающая сила равна сумме произведений напряженности поля на длину соответствующих участков магнитной цепи. В приведенной общей форме закон полного тока широко используется для расчета магнитных полей электрических машин и аппаратов.

§ 29. Магнитная проницаемость. Магнитный поток

Магнитная индукция, как и напряженность магнитного поля, — векторная величина, причем в подавляющем большинстве случаев векторы магнитной индукции и напряженности имеют одинаковое направление. Между магнитной индукцией и напряженностью поля

существует прямая пропорциональность, т. е.

$$B = \mu_a H,$$

где μ_a — абсолютная магнитная проницаемость.

Абсолютная магнитная проницаемость, равная отношению магнитной индукции к напряженности магнитного поля, имеет размерность генри/метр ($\text{Гн/м} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А} \cdot \text{м}}$) и для вакуума равна $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Эта величина называется магнитной постоянной μ_0 .

Число, показывающее, во сколько раз абсолютная магнитная проницаемость μ_a данной среды больше магнитной постоянной μ_0 , называется относительной магнитной проницаемостью μ_r или сокращенно магнитной проницаемостью, т. е. $\mu_r = \mu_a / \mu_0$.

Для воздуха магнитная проницаемость μ_r принимается равной единице, как и для всех тел, кроме ферромагнитных.

Что же касается ферромагнитных тел, то для них магнитная проницаемость значительно больше единицы и является для одного и того же материала величиной не постоянной, а зависящей от магнитного состояния этого материала, т. е. от магнитной индукции ферромагнитного тела, подвергнутого намагничиванию.

Для характеристики магнитных свойств ферромагнитных материалов служит зависимость между B и H , изображенная графически в виде кривой, называемой кривой намагничивания.

Для получения кривой намагничивания какого-либо материала строят график, по горизонтальной оси которого откладывают величины напряженности поля, а по вертикальной — величины магнитной индукции испытуемого материала.

Произведение магнитной индукции на величину какой-либо поверхности в магнитном поле, расположенной перпендикулярно направлению магнитных линий, называется магнитным потоком, пронизывающим эту поверхность. Таким образом, обозначив магнитный поток буквой Φ , получим $\Phi = BS$, где S — площадь поверхности, пронизываемой магнитным потоком.

Если магнитная индукция B выражена в теслах, а площадь поверхности S — в квадратных метрах, то магнитный поток выражается в веберах (Вб), т. е. $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Т} \cdot 1 \text{ м}^2$.

Например, если перпендикулярную магнитным линиям площадку в $0,5 \text{ м}^2$ пронизывает магнитный поток $\Phi = 1 \text{ Вб}$, то магнитная индукция $B = \frac{1}{0,5} = 2 \text{ Тл}$.

§ 30. Взаимодействие проводников с токами

Если два или несколько проводников, по которым проходят электрические токи, расположить параллельно, то эти проводники в зависимости от направлений токов в них будут взаимно притягиваться или отталкиваться. Такое взаимодействие между проводниками происходит в результате возникновения магнитного поля вокруг каждого из проводников с током.

Представим себе два проводника ab и $вг$ (рис. 29, a), по которым проходят токи противоположных направлений. Вокруг проводников имеются магнитные поля. Согласно правилу буравчика магнитные линии этих полей направлены так, как указано в нижней части рисунка. Если смотреть сверху вдоль проводников, то вокруг проводника ab магнитные линии направлены по часовой стрелке, а вокруг проводника $вг$ — против часовой стрелки. Таким образом, эти линии в пространстве между проводниками имеют одинаковые направления и проводники будут взаимно отталкиваться подобно тому, как взаимно отталкиваются одноименные полюсы магнитов.

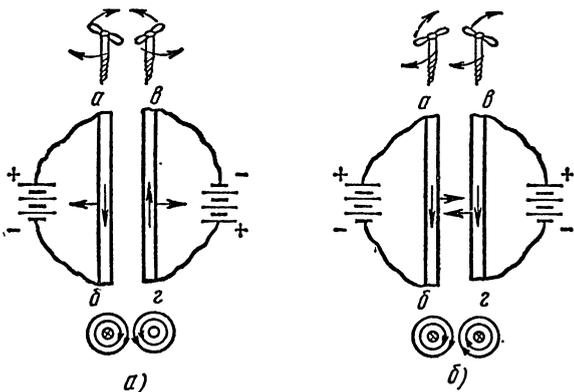


Рис. 29. Взаимодействие проводников с токами: a — различных направлений, b — одинаковых направлений

Если через те же проводники пропустить токи одинаковых направлений, как это изображено на рис. 29, b , то линии магнитных полей, возникающих вокруг проводников, в пространстве между проводниками получают направление в противоположные стороны, поэтому проводники будут взаимно притягиваться.

Сила взаимодействия между проводниками, по которым протекают токи, прямо пропорциональна произведению этих токов I_1 и I_2 , абсолютной магнитной проницаемости μ_a , а также длине l (длине сближения), на протяжении которой проводники идут параллельно, и обратно пропорциональна расстоянию между проводниками a , т. е.

$$F = \mu_a I_1 I_2 l / 2 \pi a.$$

Если провода находятся в немагнитной среде, т. е. $\mu_a = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ В} \cdot \text{с} / \text{А} \cdot \text{м}$, то сила взаимодействия между проводниками $F = 2 I_1 I_2 l / a \cdot 10^{-7} \text{ Н}$.

§ 31. Гистерезис

Начальная кривая намагничивания определяет соотношения между магнитной индукцией и напряженностью B и H лишь для ферромагнитного материала, который не подвергался намагничиванию.

Соленоид, содержащий железный сердечник, называется электромагнитом. Если цепь (рис. 30, a), состоящая из источника тока B (например, из аккумуляторной батареи), переключателя Π на два положения (1—2 и 3—4), реостата P и электромагнита \mathcal{E} , разомкнута, то тока в обмотке электромагнита \mathcal{E} нет. Установим переключатель Π на контакты 1—2 и введем полностью сопротивление реостата. При этом в цепи появится небольшой ток и проходить он будет в следующем

направлении: плюс батареи B , контакт 1 , реостат P , обмотка электромагнита \mathcal{E} , контакт 2 , минус батареи B .

В соответствии с величиной этого тока в электромагните возникнет магнитное поле с некоторой напряженностью H_a и магнитной индукцией B_a . Применив правило буравчика, найдем, что магнитный поток

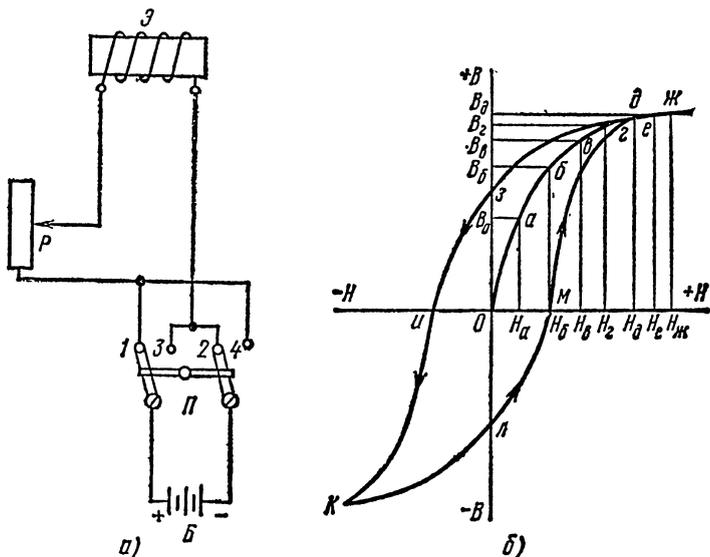


Рис. 30. Схема намагничивания стального сердечника (а) и петля гистерезиса (б)

в сердечнике электромагнита направлен справа налево, т. е. левый конец сердечника является северным, а правый — южным полюсом электромагнита \mathcal{E} .

Отложим на горизонтальной оси (рис. 30, б) в масштабе значение напряженности поля H_a , а на вертикальной — значение B_a . Восстановив перпендикуляры из точек отложенных значений на горизонтальной и вертикальной осях, получим точку пересечения a , которая определит первую точку кривой первоначального намагничивания сердечника электромагнита.

Перемещая движок реостата P вниз, будем уменьшать его сопротивление, вследствие чего увеличится как ток в обмотке электромагнита, так и напряженность магнитного поля. Построив указанным выше способом точки $б$, $в$, $г$ и $д$ и соединив их между собой, получим кривую первоначального намагничивания сердечника.

Эта кривая показывает, что магнитная индукция в начале намагничивания увеличивается пропорционально напряженности поля (участок Oa), затем рост ее замедляется, кривая делает перегиб (точка $б$) и снова приближается к прямолинейной, но уже с небольшим наклоном к горизонтальной оси. На данном последнем участке увеличение напряженности поля вызывает малый рост магнитной индукции, и дальнейший перевод движка реостата P практически не дает повышения маг-

нитной индукции в сердечнике электромагнита. В этом случае говорят, что сердечник достиг магнитного насыщения.

С уменьшением напряженности намагничивающего поля электромагнита магнитная индукция железного сердечника также начинает уменьшаться, но остается несколько большей, чем в процессе намагничивания, при одних и тех же значениях напряженности. При размыкании цепи ток в электромагните прекратится, а индукция все же будет иметь некоторое значение, определяемое отрезком Oz (см. рис. 30, б). Это указывает на то, что в сердечнике сохранился некоторый остаточный магнетизм. Если дальнейшее размагничивание прекратить, то железный сердечник окажется искусственным (постоянным) магнитом и будет обладать остаточной магнитной индукцией.

Рассмотренное нами отставание уменьшения магнитной индукции от уменьшения напряженности магнитного поля называется гистерезисом.

Чтобы железный сердечник не имел остаточного магнетизма, необходимо подвергнуть его перемагничиванию, т. е. намагничиванию в обратном направлении. Для этого нужно переключатель Π (см. рис. 30, а) перевести на контакты 3—4. При таком положении переключателя в обмотке электромагнита возникает ток противоположного направления, а именно: плюс батареи B , контакт 3, обмотка электромагнита \mathcal{E} , реостат R , контакт 4, минус батареи B .

Согласно правилу буравчика под действием этого тока в электромагните возникает магнитное поле, направленное слева направо, т. е. противоположно магнитному потоку остаточного магнетизма, которое будет размагничивать сердечник. Постепенно передвигая движок реостата, достигнем положения, при котором напряженность магнитного поля электромагнита представит собой величину, определяемую отрезком $Oи$ (см. рис. 30, б). Такому значению напряженности будет соответствовать магнитная индукция в сердечнике электромагнита, равная нулю, т. е. сердечник перестанет быть магнитом.

Значение напряженности поля, при котором сердечник размагничивается, называется коэрцитивной (задерживающей) силой.

Если провести, как говорят, полный цикл перемагничивания, т. е. уменьшить ток в обмотке электромагнита от какого-то наибольшего значения до нуля, затем, изменив направление тока, увеличить его до начальной наибольшей величины, после этого опять уменьшить до нуля, затем вторично, переменяв направление, довести его до начальной величины, то значения магнитной индукции будут изменяться по кривой, называемой петлей гистерезиса.

При перемагничивании на преодоление трения между молекулярными магнетиками расходуется некоторое количество энергии, носящее название потерь на гистерезис. Эта энергия, превращаясь в тепло, нагревает перемагничиваемые ферромагнитные материалы (части аппаратов).

Ферромагнитные материалы имеют большую магнитную проницаемость и обладают свойством намагничиваться, что объясняется следующим. Непрерывное движение электронов в любом веществе можно рассматривать как внутримолекулярные токи, возбуждающие магнит-

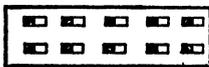
ное поле. Поскольку электроны не только движутся вокруг ядра, но и вращаются вокруг собственной оси, возникает также магнитное поле, вызванное вращением электронов, причем это магнитное поле значительно сильнее поля, вызванного движением электронов вокруг ядра.



а)



б)



в)

Рис. 31. Схема ферромагнитного материала:

а — вне магнитного поля, б — в магнитном поле, в — при насыщении

В неферромагнитных веществах магнитные поля, вызванные вращением электронов вокруг собственной оси, в каждом атоме взаимно уравновешиваются и тело не обладает свойством намагничиваться.

В ферромагнитных материалах магнитные поля, образованные вращательным движением электронов, не уравновешены благодаря особому строению атомов. Под действием этих полей в теле возникают намагниченные области, подобные мельчайшим магнетикам. При отсутствии внешнего магнитного поля магнетики расположены беспорядочно (рис. 31, а) и ферромагнитное тело не проявляет магнитных свойств.

При намагничивании железного сердечника некоторые магнетики под действием напряженности намагничивающего поля начинают поворачиваться так, что северные полюсы их постепенно обращаются в одну сторону, а южные — в другую (рис. 31, б), затем с увеличением напряженности намагничивающего поля поворачиваются и остальные молекулярные магнетики. В железном сердечнике, доведенном до магнитного насыщения, молекулярные магнетики расположены так, как это схематически показано на рис. 31, в

§ 32. Электромагниты

Свойство электрического тока создавать магнитное поле широко используется на практике.

Железный или стальной стержень, помещенный внутрь соленоида, при пропускании тока по соленоиду приобретает магнитные свойства. Стержень магнитотвердой стали вследствие большой величины коэрцитивной силы, свойственной этому материалу, в значительной мере сохраняет магнитные свойства и после исчезновения тока.

Полярность электромагнита можно определить по правилу буравчика, или так: северный полюс электромагнита находится с той его стороны, где ток для наблюдателя, смотрящего на конец электромагнита, идет против часовой стрелки, а южный — где направление тока совпадает с направлением движения часовой стрелки.

В устройствах электроники и связи часто применяют полярные электромагниты, у которых либо сердечник, либо якорь, либо оба вместе представляют собой магниты.

Неполяризованный электромагнит притягивает свой якорь независимо от направления посылаемого в его обмотку тока. Работа же поляризованного электромагнита зависит от направления тока в его

обмотке. Так, например, в прямом поляризованном электромагните ток одного направления усиливает магнитное поле его сердечника, а другого — ослабляет.

Электромагниты нашли широкое применение в подъемных и тормозных устройствах, для закрепления в станках стальных обрабатываемых деталей, в электроавтоматах, реле и других устройствах.

§ 33. Электромагнитная индукция

Представим себе два параллельных проводника ab и $вг$ (рис. 32), расположенных на близком расстоянии один от другого. Проводник ab подключен к зажимам батареи B ; цепь включается ключом K , при замыкании которого по проводнику проходит ток в направлении от a к $б$. К концам же проводника $вг$ присоединен чувствительный амперметр A , по отклонению стрелки которого судят о наличии тока в этом проводнике.

Если в собранной таким образом схеме замкнуть ключ K , то в момент замыкания цепи стрелка амперметра отклонится, свидетельствуя

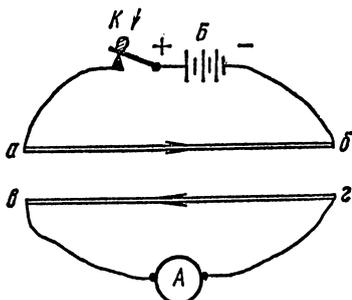


Рис. 32. Схема возникновения тока при изменении его направления в одном из параллельных проводников

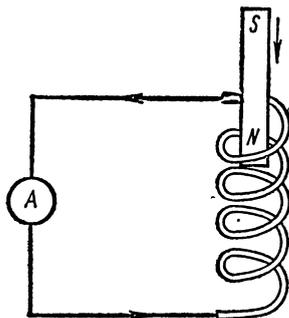


Рис. 33. Схема возникновения тока при изменении магнитного поля

о наличии тока в проводнике $вг$; по прошествии же небольшого промежутка времени (долей секунды) стрелка амперметра придет в исходное (нулевое) положение. Размыкание ключа K опять вызовет кратковременное отклонение стрелки амперметра, но уже в другую сторону, что будет указывать на возникновение тока противоположного направления.

Подобное отклонение стрелки амперметра A можно наблюдать и в том случае, если, замкнув ключ K , приближать проводник ab к проводнику $вг$ или удалять от него. Приближение проводника ab к $вг$ вызовет отклонение стрелки амперметра в ту же сторону, что и при замыкании ключа K , удаление проводника ab от проводника $вг$ повлечет за собой отклонение стрелки амперметра, аналогичное отклонению при размыкании ключа K .

При неподвижных проводниках и замкнутом ключе K ток в проводнике $вг$ можно вызвать изменением величины тока в проводнике ab .

Аналогичные явления происходят и в том случае, если проводник, питаемый током, заменить магнитом или электромагнитом.

Так, например, на рис. 33 схематически изображена катушка (соленоид) из изолированной проволоки, к концам которой подключен амперметр А. Если внутрь обмотки быстро ввести постоянный магнит (или электромагнит), то в момент его введения стрелка амперметра А отклонится; при выведении магнита будет также наблюдаться отклонение стрелки амперметра, но в другую сторону.

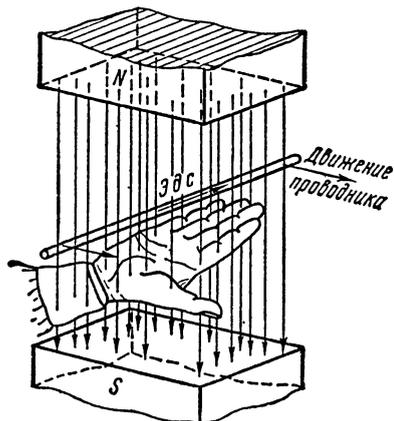


Рис. 34. Правило правой руки

которое формулируется так: *если правую руку расположить ладонью к северному полюсу так, чтобы большой отогнутый палец показывал направление движения проводника, то четыре пальца будут указывать направление эдс индукции.*

Направление индукционного тока, а следовательно, и эдс индукции определяют также **по правилу Ленца**, которое формулируется следующим образом: *эдс индукции имеет всегда такое направление, что созданный ею индукционный ток препятствует причине, ее вызывающей.*

Величина эдс индукции, возникающей в замкнутом проводнике, пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего контур этого проводника. Таким образом, если магнитный поток, пронизывающий контур замкнутого проводника, уменьшился на величину $\Delta\Phi$ в течение Δt секунд, то скорость уменьшения магнитного потока равна $\Delta\Phi/\Delta t$. Это отношение и представляет собой величину эдс индукции e , т. е.

$$e = -\Delta\Phi/\Delta t.$$

Знак минус указывает на то, что ток, созданный эдс индукции, препятствует причине, вызвавшей эту эдс.

Возникновение эдс индукции в замкнутом контуре происходит как при движении этого контура в магнитном поле, так и при изменении магнитного потока, пронизывающего неподвижный контур.

Если контур имеет w витков, то индуктированная эдс

$$e = -w\Delta\Phi/\Delta t.$$

Произведение числа витков и магнитного потока, пронизывающих их, называется *потокосцеплением* $\psi = \omega\Phi$, следовательно, индуцированная в катушке эдс

$$e = -\omega\Delta\Phi/\Delta t = -\Delta\psi/\Delta t.$$

Эта формула, выражающая закон электромагнитной индукции, является исходной для определения эдс, индуцируемых в обмотках электротехнических машин и аппаратов.

Когда контур охватывается лишь частью магнитного потока, величина эдс индукции зависит от скорости изменения не всего потока, а лишь части его.

Положим, что прямоугольный замкнутый контур *abvg* (рис. 35), стороны которого равны *l* и *h*, находится в магнитном поле, магнитная индукция которого во всех точках равна *B* (Тл) и направлена за плоскость рисунка. Пусть контур, оставаясь в плоскости рисунка, перемещается с равномерной скоростью сверху вниз и в течение *t* с выходит за пределы магнитного поля.

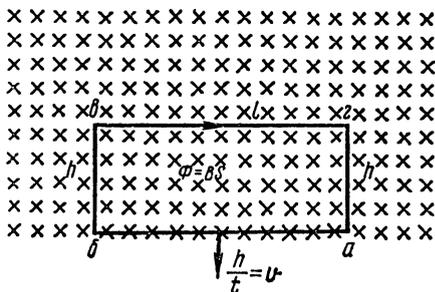


Рис. 35. Замкнутый контур, перемещающийся в магнитном поле

Так как контур *abvg* перемещается вниз, то магнитный поток, пронизывающий контур, уменьшается. Следовательно, направление эдс индукции совпадает с вращательным движением рукоятки буравчика, ввинчиваемого вдоль магнитных линий, т. е. по часовой стрелке. Величина этой эдс индукции определится из следующих соображений. Площадь, ограниченная контуром проводника, $S = lh$. Магнитный поток, пронизывающий контур проводника, $\Phi = BS$. Чтобы уйти за пределы магнитного поля, т. е. чтобы изменить магнитный поток от Φ до нуля или на величину $\Delta\Phi = \Phi$, требуется, чтобы $\Delta t = t$.

Следовательно, $E = \Delta\Phi/\Delta t = \Phi/t$ или $E = Blh/t$.

Частное от деления пути *h*, пройденного проводником, на время *t* представляет собой скорость движения этого проводника. Обозначив ее буквой *v*, получим $E = Blv$.

Если в этой формуле магнитная индукция *B* выражена в теслах, длина *l* — в метрах и скорость *v* — в метрах на секунду (м/с), то эдс индукции выражается в вольтах. Эта формула справедлива лишь в том случае, если проводник перемещается в магнитном поле в направлении, перпендикулярном магнитным силовым линиям этого поля.

Если проводник пересекает магнитные линии под каким-либо углом, то

$$E = Blv \sin \alpha,$$

где α — угол между направлением движения проводника и направлением вектора магнитной индукции (магнитных линий).

§ 34. Вихревые токи

Индукционные токи возникают не только в изолированных проводниках и обмотках, но и в сплошных металлических массах генераторов, электромагнитных аппаратов и механизмов, которые подвергаются действию изменяющихся магнитных полей.

Эти токи, названные в и х р е в ы м и, вызывают дополнительные затраты энергии, превращающейся в тепло, нагревающее части приборов.

Вихревые токи, оказывающие вредное влияние, устраняют путем специальной сборки сердечников и применения для их изготовления магнитомягких сортов стали. Сердечники электромагнитных устройств (трансформаторов, дросселей, электродвигателей и т. д.) собирают из тонких листов стали, покрытых бумагой, окалиной или изолирующим лаком. Однако полностью избежать нагревания, обусловленного вихревыми токами, невозможно, и в тех случаях, когда нагревание может достичь высоких степеней, прибегают к искусственному охлаждению приборов. Например, мощные трансформаторы помещают в бак с маслом, которое хорошо отводит тепло.

Потери энергии от вихревых токов зависят не только от свойств материала, в котором они возникают, и толщины стальных пластин, из которых собран магнитопровод аппарата или машины, но также от магнитной индукции и скорости ее изменения.

В некоторых случаях вихревые токи оказывают положительное влияние. Так, например, на использовании вихревых токов основана работа индукционных электродвигателей, индукционных электропечей для плавки металлов, индукционных электроизмерительных приборов (счетчики электроэнергии), сушка древесины, закалка металлов и др.

§ 35. Самоиндукция

Как известно, при изменении магнитного потока, пронизывающего виток проволоки, в этом витке возникает эдс индукции. Подобное явление наблюдается и в том случае, когда проходящий по витку ток изменяется по величине или направлению. Такой процесс возникновения электродвижущей силы индукции называется с а м о и н д у к ц и е й. Самоиндукцию можно наблюдать, например, при размыкании и замыкании цепи тока. В момент размыкания вследствие исчезновения магнитного потока в цепи индуктируется эдс самоиндукции, которая стремится поддерживать неизменное значение тока. В момент замыкания магнитный поток, создаваемый проходящим по цепи током, увеличивается, а появляющаяся эдс самоиндукции препятствует нарастанию тока.

Таким образом, при замыкании цепи вследствие противодействия эдс самоиндукции ток не может мгновенно достигнуть полной величины, а при размыкании также вследствие противодействия эдс самоиндукции исчезновение тока в цепи наступает не мгновенно, а постепенно.

В некоторых случаях, например в измерительных приборах и при изготовлении реостатов, необходимо устранить самоиндукцию. Чтобы устранить самоиндукцию, проволоку, применяемую для изготовления реостата, сгибают вдвое и в таком виде навивают на каркас (рис. 36). При этом магнитное действие одного витка уничтожается действием

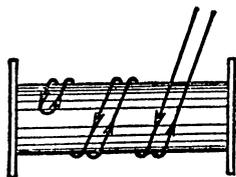


Рис. 36. Бифилярная обмотка.

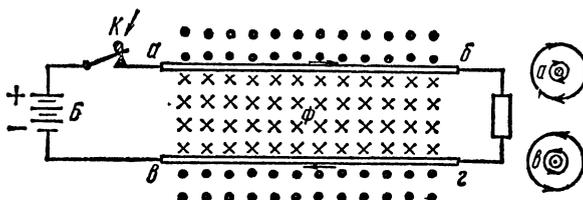


Рис. 37. Схема к возникновению эдс самоиндукции

соседнего и результирующий магнитный поток, образуемый током, протекающим по обмотке, будет равен нулю. Следовательно, в такой обмотке не будет самоиндукции. Безындукционная обмотка называется б и ф л я р н о й.

Явление самоиндукции присуще не только обмоткам, но и прямолинейным проводникам. В этом случае эдс самоиндукции вызывается магнитным потоком, возникающим в контуре, ограниченном двумя проводниками или проводником и землей, если последняя составляет элемент цепи.

Положим, что два прямолинейных проводника ab и $вг$ (рис. 37) включены в цепь батареи B с помощью ключа K . При замыкании ключа в цепи возникает ток. В первые моменты после замыкания ключа K контур, составленный проводниками ab и $вг$, будет пронизываться увеличивающимся магнитным потоком Φ , магнитные линии которого (по правилу буравчика) окажутся направленными в пределах контура — за плоскость рисунка, а вне контура — из-за плоскости рисунка.

Под действием нарастающего магнитного потока Φ в замкнутой цепи возникает эдс самоиндукции, которая будет направлена против вращательного движения рукоятки буравчика, т. е. навстречу току батареи B .

Если замкнутый проводник состоит из одного витка проволоки, то магнитный поток Φ , пронизывающий контур этого проводника при постоянной магнитной проницаемости, пропорционален току I , проходящему по проводнику. Обозначив коэффициент пропорциональности буквой L , можем написать следующее равенство: $\Phi = LI$ или $L = \Phi / I$.

Величина L называется индуктивностью данного проводника.

Если рассматриваемый нами замкнутый контур состоит не из одного витка, а представляет собой обмотку, содержащую ω витков, охватывающих один и тот же магнитный поток Φ , то индуктивность такой обмотки $L = \omega\Phi / I = \psi / I$.

Единицей индуктивности является генри (Гн). Один генри — это индуктивность такой цепи, в которой при равномерном изменении тока на один ампер в секунду индуцируется эдс самоиндукции в один вольт. Одна тысячная доля генри называется миллигенри (мГн); $1\text{Гн} = 1000\text{ мГн}$.

Если в цепи, обладающей индуктивностью L ток в течение Δt (с) изменяется на величину ΔI (А), то в такой цепи возникает эдс самоиндукции

$$e_L = -L\Delta I/\Delta t.$$

Знак минус в этой формуле указывает на то, что при уменьшении тока (приращение ΔI — отрицательная величина) эдс самоиндукции положительна и наоборот.

§ 36. Расчет индуктивности

Намагничивающая сила $F = \omega I$ возбуждает магнитное поле, которое встречает на своем пути магнитное сопротивление, равное

$$R_M = l/\mu_a S,$$

где l — длина магнитного пути, м; S — сечение этого пути, м^2 ; μ_a — абсолютная магнитная проницаемость среды, в которой замыкается магнитный поток.

По аналогии с электрической цепью закон Ома для магнитной цепи запишется в следующем виде:

$$\Phi = F/R_M = \omega I/R_M \text{ и } \psi = \omega\Phi = \omega^2 I/R_M.$$

Следовательно, индуктивность

$$L = \psi/I = \omega^2/R_M = \mu_a S\omega^2/l.$$

Магнитная цепь катушки состоит из двух участков; внутри катушки и вне катушки; магнитное сопротивление состоит также из двух частей: из внутреннего $R_{M.в}$ и наружного $R_{M.н}$ сопротивлений. Определить сопротивление вне катушки $R_{M.н}$ для расходящегося в пространстве магнитного потока очень сложно.

Если длина катушки l_k значительно больше ее диаметра d_k ($l_k \gg d_k$), то магнитным сопротивлением наружного участка можно пренебречь и считать индуктивность катушки равной:

$$L_k = \omega^2/R_{M.в} = \mu_0 S\omega^2/l = 4\pi \cdot 10^{-7} S\omega^2/l.$$

Если катушка помещена на замкнутом стальном магнитопроводе (дроссель), относительная магнитная проницаемость материала которого μ , то индуктивность дросселя $L = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \mu S\omega^2/l$.

В случае, когда в магнитопроводе дросселя сделан немагнитный зазор длиной l_3 , м, индуктивность дросселя

$$L = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{S\omega^2}{(l_3 + l_c/\mu)},$$

где l_c — длина средней магнитной линии по стали сердечника дросселя, м.

§ 37. Энергия магнитного поля

При включении цепи, содержащей сопротивление и индуктивность, ток не сразу достигает своего установившегося значения $I=U/R$, так как индуцируемая эдс самоиндукции $e_L=-L\Delta i/\Delta t$ противодействует изменению тока, задерживая его увеличение (рис. 38). При постепенном возрастании тока в окружающем пространстве возникает магнитное поле и в нем происходит накопление части энергии, израсходованной источником тока.

Когда ток в цепи достигает установившегося значения $I=U/R$, его возрастание прекращается и эдс самоиндукции исчезает. Таким

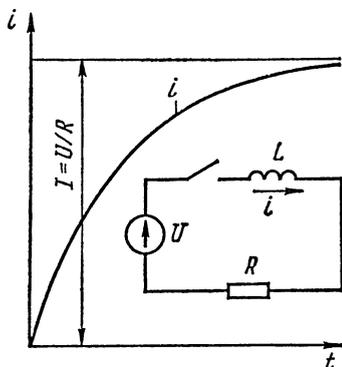


Рис. 38. График, показывающий нарастание тока в цепи с индуктивностью, и условные обозначение такой цепи

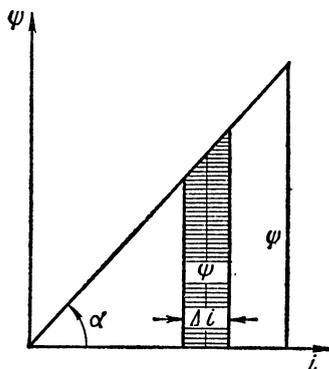


Рис. 39. Графическое изображение накопления энергии в магнитном поле

образом, в переходном процессе напряжение источника электроэнергии затрачивается не только на преодоление сопротивления R , но и на преодоление эдс самоиндукции, т. е.

$$U = iR + (-e_L) = iR + L\Delta i/\Delta t.$$

Умножив это уравнение напряжения на $i\Delta t$, получим энергетическое уравнение цепи:

$$Ui\Delta t = i^2R \Delta t + Li\Delta i.$$

Левая часть этого уравнения выражает энергию, сообщаемую источником электрической цепи за время Δt . Первый член правой части уравнения определяет энергию, израсходованную на нагрев сопротивления R за то же время Δt . Второе слагаемое правой части уравнения выражает энергию, накапливаемую в магнитном поле за время Δt при увеличении тока на Δi , т. е.

$$\Delta W_M = Li\Delta i = \psi\Delta i.$$

Если в магнитном поле нет ферромагнитных материалов, то магнитный поток Φ , а следовательно, и потокосцепление ψ прямо пропорциональны силе тока I . Линейная зависимость потокосцепления от

тока графически изображена на рис. 39 прямой линией, проходящей через начало координат и образующей с осью тока угол α , зависящий от выбранного масштаба для ψ и I . На графике изменение энергии магнитного поля $\psi \Delta i$ изобразится заштрихованной площадью. В момент, когда магнитный поток достигнет значения $\Phi = \omega I / R_m$, соответствующего установившемуся значению тока $I = U/R$, эдс самоиндукции исчезает и накопление энергии в магнитном поле прекращается. Накопленная в магнитном поле энергия W_m (Дж) при возрастании тока в цепи на графике выразится суммой всех площадок $\psi \Delta i$ при изменении тока от 0 до установившегося значения I , т. е. площадью прямоугольного треугольника с катетами ψ и I , т. е.

$$W_m = \frac{\psi I}{2} = \frac{LI^2}{2}.$$

При некоторых расчетах нужно знать запас энергии в единице объема магнитного поля, называемый удельной энергией магнитного поля. Заменяя в предыдущей формуле $\psi = \omega \Phi = \omega BS$ и $\omega I = Hl$, получим:

$$W_m / lS = W_m / V = \frac{BH}{2},$$

где $V = lS$ — объем, занимаемый равномерным магнитным полем, m^3 .

§ 38. Взаимоиндукция

Рассмотренное нами явление образования индукционных токов в параллельных проводниках (см. рис. 32) называется в а и м о и н д у к ц и е й.

Взаимоиндукция наблюдается не только в моменты возникновения и исчезновения тока, но и при всяком его изменении. Появляющаяся в подобных случаях эдс в цепях, непосредственно не содержащих источников тока, называется эдс в з а и м о и н д у к ц и и.

Возникновение эдс взаимной индукции объясняется тем, что контур замкнутого проводника пронизывается изменяющимся магнитным потоком, который создается током, проходящим по соседнему проводнику.

Положим, имеется два контура I и II (рис. 40), состоящие каждый из одного замкнутого витка. При прохождении тока I_1 по контуру I от какого-либо источника (не показанного на рисунке) возбуждается магнитный поток Φ_1 , который частично пронизывает и контур II . Очевидно, что величины как всего магнитного потока Φ_1 , так и его части Φ_2 , пронизывающей контур II , пропорциональны току I_1 . Таким образом, соотношение между потоком Φ_2 и током I_1 можно представить в виде следующего равенства: $\Phi_2 = MI_1$, где M — некоторый

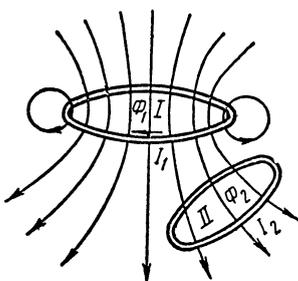


Рис. 40. Схема к возникновению эдс взаимной индукции в замкнутых витках

коэффициент, зависящий от геометрических размеров контуров и их взаимного расположения.

Этот коэффициент называется взаимной индукцией. Взаимная индукция так же, как и индуктивность, измеряется в генри, миллигенри и микрогенри. Взаимной индукцией в один генри обладают два контура в том случае, если в одном из них возникает эдс взаимной индукции в один вольт при равномерном изменении тока на один ампер в одну секунду в другом контуре.

Величина взаимной индукции M между двумя контурами может быть выражена через индуктивности этих контуров. Если индуктивность одной цепи L_1 , а индуктивность второй L_2 и магнитный поток, возникающий в контуре первой цепи (влияющей), полностью пронизывает контур второй цепи (подвергнутой влиянию), то $M = \sqrt{L_1 L_2}$.

Поскольку практически всегда часть магнитных линий первой цепи замыкается помимо второй цепи или, как говорят, всегда происходит рассеяние магнитного потока, то практически $M < \sqrt{L_1 L_2}$.

Таким образом, в предыдущее равенство должен быть введен некоторый множитель k , меньший чем единица: $M = k\sqrt{L_1 L_2}$.

Множитель k называется коэффициентом связи. Явление взаимной индукции используется в трансформаторах. В ряде случаев явление взаимной индукции оказывает вредное влияние. Например, при сближении проводов высоковольтных цепей с линиями связи взаимная индукция может быть не только источником помех, но и опасных пере напряжений в линиях связи.

Контрольные вопросы

1. Как определить направление магнитного поля, возбужденного вокруг проводника с током?
2. Что называется напряженностью магнитного поля?
3. Поясните закон полного тока.
4. Что называется магнитной индукцией, магнитным потоком?
5. Что такое абсолютная и относительная магнитная проницаемость?
6. Как формулируется правило левой руки?
7. Объясните взаимодействие проводников с током.
8. Какие процессы возникают при перемагничивании стали?
9. Что такое электромагнит?
10. Как формулируется правило правой руки?
11. В чем заключается явление самоиндукции?
12. Как определяется энергия магнитного поля?
13. Что представляет собой явление взаимной индукции?

Глава IV ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК И ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 39. Получение переменной электродвижущей силы

Постоянный ток, как известно, в металлах представляет собой установившееся поступательное движение свободных электронов. Если же эти электроны вместо поступательного совершают колебательное движение, то ток периодически, через равные промежутки времени, изменяется как по величине, так и по направлению и называется переменным.

Переменный ток обладает способностью трансформироваться (изменять напряжение с помощью трансформаторов), что обеспечивает экономичную передачу электрической энергии на большие расстояния. Кроме того, двигатели переменного тока отличаются простотой устройства и малыми габаритами. Поэтому переменный ток применяется очень широко, и почти вся электрическая энергия вырабатывается генераторами переменного тока.

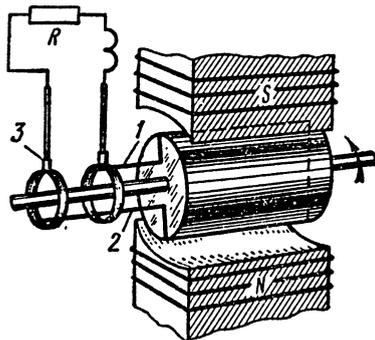


Рис. 41. Схема устройства простейшего генератора переменного тока:
1 и 2 — проводники, 3 — щетка

Схема устройства простейшего генератора переменного тока изображена на рис. 41. В магнитном поле электромагнита NS , возбуждаемом постоянным током в его обмотке, помещен виток из проводников 1 и 2. Концы витка соединены с металлическими кольцами, изолированными друг от друга и от корпуса и вращающимися вместе с витком. На кольцах установлены неподвижные щетки 3, посредством которых виток может быть замкнут на сопротивление

внешней нагрузки.

Предположим, что магнитное поле между полюсами N и S равномерно, т. е. магнитная индукция по величине и направлению всюду одинакова. За время одного оборота плоскость витка описывает угол в 360° . Разобьем этот угол на восемь равных частей, по 45° каждая, и рассмотрим, как будет изменяться магнитный поток, пронизывающий контур витка, при его переходе из одного положения в другое в процессе вращения. Отдельные положения витка относительно магнитного поля показаны в верхней части рис. 42.

Начнем рассматривать с момента, когда плоскость витка расположена перпендикулярно направлению магнитных линий (положение I). В этот момент контур витка пронизывается наибольшим магнитным по-

током, величину которого обозначим Φ_1 ; движение проводников витка происходит в вертикальном направлении, совпадающем с направлением магнитных силовых линий, следовательно, проводники не пересекают магнитных линий, а потому магнитный поток, пронизывающий контур витка, не изменяется и эдс равна нулю.

Начиная с этого положения, проводники 1 и 2 витка, двигаясь по окружности, перемещаются под углом к направлению магнитных линий и пересекают их. Пересеченные магнитные линии оказываются вне витка и, следовательно, магнитный поток, пронизывающий контур витка, уменьшается. Так как величина этого магнитного потока изме-

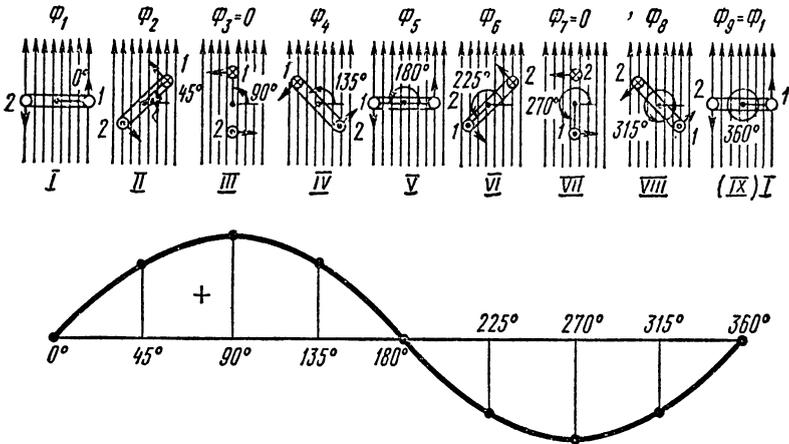


Рис. 42. Временная диаграмма

няется, то на основании закона электромагнитной индукции в витке возникает эдс индукции. При переходе плоскости витка из положения I в положение II, т. е. при повороте на угол 45° , эдс индукции возрастает до некоторой величины, определяемой отношением изменения магнитного потока от Φ_1 до Φ_2 , т. е. $\Phi_1 - \Phi_2$, к времени Δt , в течение которого происходит изменение. Эдс в витке имеет следующее направление (положение II): в проводе 1 — за плоскость рисунка, а в проводе 2 — из-за плоскости рисунка. Условимся считать это направление эдс положительным. В таком случае величину эдс, действующей в замкнутой цепи витка в момент прохода его через положение II, мы должны отложить в виде некоторого отрезка, как это показано на диаграмме в нижней части рис. 42.

При переходе плоскости витка из положения II в положение III, т. е. при повороте еще на угол 45° , магнитный поток, пронизывающий контур витка, уменьшившись до нуля, изменится на величину $\Phi_2 - 0 = \Phi_2$. Так как в данном случае магнитный поток изменится больше, чем при переходе витка из положения I в положение II, то эдс в витке, когда он находится в положении II, больше эдс, соответствующей положению III. Поэтому эдс, соответствующую положению III витка, когда плоскость его находится под углом 90° к направлению исходного положения, мы должны отложить в виде отрезка большей

величины, чем предыдущий. Этот отрезок, как и предыдущий, отложен на диаграмме выше горизонтальной оси потому, что в обоих проводах 1 и 2 электродвижущая сила имеет положительное направление, т. е. в проводе 1 — за плоскость рисунка, а в проводе 2 — из-за плоскости рисунка, в чем нетрудно убедиться, применив правило правой руки.

Во время дальнейшего вращения плоскости витка эдс в нем будет уменьшаться, оставаясь положительной. Когда плоскость витка повернется на 180° от начального положения и займет положение V, эдс в нем уменьшится до нуля, несмотря на то что магнитный поток, пронизывающий контур витка, так же как и при положении I, имеет наибольшую величину.

После перехода плоскости витка через положение V направление эдс индукции в нем изменяется: в проводе 1 — из-за плоскости рисунка, а в проводе 2 — за плоскость рисунка. По мере поворота витка эдс в нем по абсолютной величине увеличивается. В момент прохода витка через положение VII эдс имеет наибольшее значение, равное по абсолютной величине, но противоположное по знаку эдс в витке при положении III. При дальнейшем вращении витка эдс в нем по абсолютной величине уменьшается и, наконец, при повороте плоскости витка на 360° от начального положения становится равной нулю. С этого момента процесс изменения эдс повторяется аналогично описанному выше.

Соединив вершины отрезков, выражающих величины эдс для отдельных положений плоскости витка, плавной линией, получим так называемую в р е м е н н у ю д и а г р а м м у, представляющую собой синусоиду. Переменная эдс и ток, изменяющиеся согласно указанной кривой, называются синусоидами.

Таким образом, величина эдс, индуктируемой в проводнике, перемещающемся с равномерной скоростью в однородном магнитном поле, зависит от угла между направлением магнитных линий и направлением движения этого проводника.

§ 40. Синусоидальная электродвижущая сила

Переменный синусоидальный ток проходит в цепи под действием синусоидальной электродвижущей силы.

Электродвижущая сила индукции, возникающая в прямолинейном проводнике, пересекающем магнитные линии (рис. 43), выражается следующей формулой: $e = Blv \sin \alpha$, где B — магнитная индукция; l — длина проводника; v — скорость его перемещения.

При вращении замкнутого проводника в магнитном поле легко подсчитать величину эдс, индуктируемой в этом проводнике, зная, на какой угол α повернулась плоскость проводника от исходного положения перпендикулярно направлению магнитных линий. Максимального значения или, как говорят, амплитуды, эдс достигает в тот момент, когда угол $\alpha = 90^\circ$. Обозначим амплитуду эдс через E_m , найдем: $E_m = Blv$.

Через амплитуду можно выразить мгновенное значение

и e эдс в произвольный момент, когда стороны замкнутого проводника пересекают магнитные линии под некоторым углом α , а именно: $e = E_m \sin \alpha$.

Угол α в данном случае называется фазовым углом эдс, или фазой.

Электродвижущая сила генератора переменного тока, так же как в цепях постоянного тока, уравнивается падениями напряжения на внутреннем сопротивлении генератора и сопротивлении внешней цепи. Ту часть эдс, которая уравнивается во внешней цепи, называют напряжением генератора и обозначают его мгновенное значение буквой u , а максимальное (амплитуду) — буквой U_m .

Для определения мгновенного значения электродвижущей силы e амплитуду E_m надо умножить на синус фазового угла (фазы) α .

Следовательно, если мы построим радиус-вектор Oa (рис. 44), равный (в масштабе напряжения) величине амплитуды E_m и будем вращать его против часовой стрелки с постоянной частотой вращения (это направление вращения принято считать положительным), то конец вектора опишет некоторую окружность с радиусом E_m .

Положим, что по прошествии некоторого времени t (с) отрезок повернулся на угол α и занял положение Ob . Опустив перпендикуляр из конца отрезка Ob на вертикальный диаметр, получим прямоугольный треугольник Ovb . Из этого треугольника находим: $Ov = E_m \sin \alpha$.

Сопоставляя полученное равенство с уравнением $e = E_m \sin \alpha$, убеждаемся, что отрезок Ov представляет собой мгновенное значение эдс, соответствующее фазовому углу α .

Способ изображения эдс, токов и напряжений в виде прямых линий определенной длины и определенного направления, или так называемых векторов, широко применяется в теории переменных токов. Соотношение между отдельными электрическими величинами и их взаимное расположение на плоскости, выраженное графически в форме векторов, называется векторной диаграммой.

Промежуток времени, необходимый для совершения переменной эдс полного цикла (круга) своих изменений, называется периодом колебаний или сокращенно периодом. Период обозначается T и измеряется в секундах.

Число периодов в одну секунду (или величина, обратная периоду) называется частотой колебаний или сокращенно час-

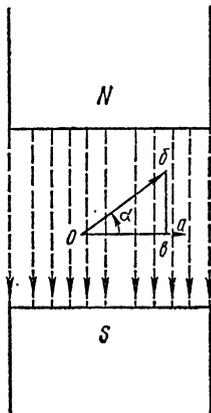


Рис. 43. Схема перемещения проводника под углом к направлению магнитных линий

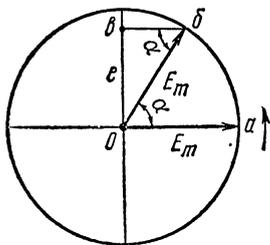


Рис. 44. Векторная диаграмма эдс

тотой. Частота обозначается $f = \frac{1}{T}$ и измеряется в герцах (Гц). Так как в рассмотренной нами диаграмме радиус Oa , равный E_m , в течение одного периода T описывает угол $\alpha = 2\pi = 360^\circ$, то отношение $2\pi/T$ является углом, описываемым тем же радиус-вектором в одну секунду. Следовательно, отношение $2\pi/T$ выражает собой угловую частоту вращения радиус-вектора. Угловая частота обозначается греческой буквой ω (омега) и равна: $\omega = 2\pi/T$.

Если ω представляет собой угол, описываемый радиус-вектором в одну секунду, то за время t угол α , описываемый тем же радиус-вектором и называемый, как мы уже знаем, фазой, будет равен: $\alpha = \omega t = 2\pi t/T$.

Так как один полный оборот совершается радиус-вектором в течение T , с, то между частотой и периодом существует соотношение $f = 1/T$ или $T = 1/f$.

Подставляя вместо T его значение в формулу для ω , получим: $\omega = 2\pi f$.

§ 41. Активное сопротивление в цепи переменного тока

Рассмотрим явления, происходящие во внешней цепи с некоторым резистором. Если сопротивление постоянному току цепи равно R_1 , то при протекании по этой цепи переменного тока сопротивление ее возрастает и станет равным некоторой величине R . Опыт показывает, что с увеличением частоты переменного тока сопротивление R возрастает.

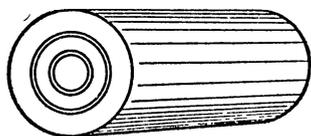


Рис. 45. Проводник, разделенный на концентрические окружности

Сопротивление проводника (не обладающего ни индуктивностью, ни емкостью) переменному току называется активным сопротивлением. Поскольку активное сопротивление проводника возрастает с увеличением частоты, то это явление, возникающее вследствие поверхностного эффекта, имеет существенное значение при высоких частотах.

Для пояснения поверхностного эффекта разделим мысленно прямолинейный провод по всей его длине на ряд концентрических цилиндров с равновеликими кольцевыми поперечными сечениями (рис. 45).

Если по такому проводу протекает постоянный ток, то очевидно, что плотность тока, т. е. число ампер на один квадратный сантиметр сечения, во всех кольцах будет одинакова и вокруг каждого из них возникает постоянное магнитное поле. Таким образом, воображаемые нами концентрические проводники окажутся окруженными замкнутыми потоками, причем по мере приближения к оси провода потоки, охватывающие эти проводники, складываясь, будут увеличиваться.

Положим теперь, что по тому же проводнику протекает переменный ток. В этом случае возникающие вокруг воображаемых нами цилиндрических проводников магнитные потоки будут также переменными. Следовательно, на основании закона электромагнитной индукции

ции в каждом из цилиндрических проводников будут появляться эдс самоиндукции, увеличивающиеся по мере приближения рассматриваемых проводников к оси провода.

Таким образом, при переменном токе возникающие переменные магнитные потоки в самом проводе наводят эдс, противодействующие основному напряжению, приложенному к концам провода. Это противодействие будет тем больше, чем ближе рассматриваемое сечение к оси провода, в результате чего ток в сечении провода распределяется не с одинаковой плотностью, а с увеличивающейся плотностью от оси к поверхности провода.

Явление поверхностного эффекта как бы уменьшает полезное сечение провода, и следовательно, увеличивает сопротивление R .

При частоте тока 50 Гц, применяющейся в промышленной электротехнике, и небольшом поперечном сечении проводника поверхностный эффект незначительно увеличивает сопротивление, а потому практически активное сопротивление проводников можно считать равным их сопротивлению постоянному току. При токах высоких частот разница между указанными сопротивлениями становится значительной.

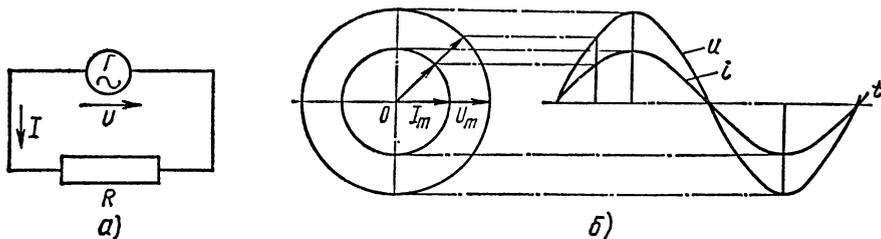


Рис. 46. Цепь переменного тока с активной нагрузкой:
а — схема, б — векторная и волновая диаграммы для напряжения u и тока i

Положим, что к зажимам цепи (рис. 46, а) от генератора Γ подается напряжение, изменяющееся по синусоидальному закону, т. е. $u = U_m \sin \omega t$.

Ток, протекающий в любой момент, определится по закону Ома как частное от деления мгновенного значения напряжения u на активное сопротивление R , т. е. $i = u/R$.

Подставляя вместо u его значение из предыдущего выражения, получим: $i = U_m/R \sin \omega t$.

Это равенство указывает на то, что ток может быть графически изображен как в виде вектора, так и в виде синусоидальной кривой (рис. 46, б). Обозначив амплитуду тока I_m , т. е. $I_m = U_m/R_m$, получим для мгновенного значения тока i следующее выражение: $i = I_m \sin \omega t$.

Для начального момента (начала периода), когда $t=0$, фаза $\omega t=0$. Следовательно, $u = U_m \sin \omega t = 0$ и $i = I_m \sin \omega t = 0$.

Таким образом, начала синусоид, изображающих напряжение и ток, совпадают с началом периода. Вектор напряжения U_m и вектор тока I_m должны быть начерчены горизонтально, вправо от точки 0,

причем вектор U_m — в масштабе напряжения, а вектор I_m — в масштабе тока.

Как видно из временных диаграмм, ток и напряжение одновременно равны нулю, одновременно достигают своих максимальных значений (амплитуд) и одновременно меняют знак при переходе через нулевые значения. Такие одновременные изменения напряжения и тока указывают на то, что они совпадают по фазе. Следовательно, если внешняя цепь содержит лишь активное сопротивление и не обладает ни индуктивностью, ни емкостью, то напряжение, приложенное к этой цепи, и ток, проходящий в ней, совпадают по фазе.

§ 42. Действующие значения тока и напряжения

Как мы уже знаем, величины $u=U_m \sin \omega t$ и $i=I_m \sin \omega t$, представляя собой мгновенные значения напряжения и тока, относящиеся к отдельным моментам, не определяют значения тока за некоторый промежуток времени. Поэтому для суждения о величине переменного тока его приравнивают к величине такого эквивалентного постоянного тока, который, протекая по такому же сопротивлению, что и переменный ток, производит одинаковое с ним тепловое действие, т. е. за один и тот же промежуток времени (за время одного или нескольких периодов T) выделяет одинаковое количество тепла. Такая величина переменного тока называется действующей.

Очевидно, что действующее значение тока меньше амплитудного.

Отношение между амплитудным значением I_m переменного тока и его действующим значением I равняется $\sqrt{2}=1,414$, т. е.

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

Подобные соотношения относятся к действующим значениям напряжения U и эдс E , т. е. $U_m = U \cdot \sqrt{2} = 1,41 \cdot U$ и $E_m = 1,41 E$ или $U = 0,707 U_m$ и $E = 0,707 E_m$.

Приборы, предназначенные для измерения напряжения и тока, а именно: вольтметры и амперметры, дают показания действующих значений соответственно напряжения и тока. Например, если вольтметр показывает напряжение переменного тока 110 В, то максимальное значение этого напряжения равно $110 \cdot \sqrt{2} = 155,54$ В.

§ 43. Катушка индуктивности в цепи переменного тока

Положим, что переменное напряжение с амплитудой U_m приложено к зажимам катушки с индуктивностью L (Г) и настолько малым активным сопротивлением R , что им можно пренебречь (рис. 47, а). Если бы вместо переменного напряжения мы приложили к той же катушке постоянное напряжение, то ввиду ничтожности активного сопротивления ток в цепи достиг бы очень большой величины. При переменном напряжении ток в катушке будет иметь меньшую вели-

чину. Это объясняется тем, что при переменном напряжении в катушке возникает также переменная эдс самоиндукции, которая складывается геометрически с приложенным напряжением и в результате оказывает влияние на ток.

Как известно, эдс самоиндукции выражается формулой

$$e_L = -L \Delta i / \Delta t.$$

Ток в цепи, содержащей индуктивность L , протекает под действием напряжения источника энергии u и эдс самоиндукции e_L , возникающей в цепи вследствие изменения тока, т. е. $i = (u + e_L) / R$, откуда

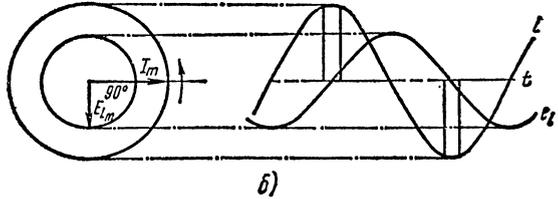
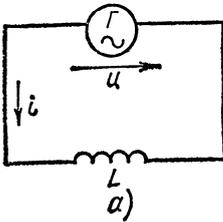


Рис. 47. Индуктивность в цепи переменного тока:
а — схема, б — векторная и волновая диаграммы для тока и эдс

$u = (-e_L) + iR$. Так как в нашем случае $R \approx 0$, то $u = -e_L = L \Delta i / \Delta t$, где $\Delta i / \Delta t$ — скорость изменения тока во времени.

В момент t ток в цепи $i = I_m \sin \omega t$, а спустя очень малый отрезок времени Δt ток будет $i + \Delta i = I_m \sin \omega (t + \Delta t)$. Следовательно, за этот отрезок времени ток изменится на величину $\Delta i = I_m [\sin \omega (t + \Delta t) - \sin \omega t]$.

Синус суммы $\sin(\omega t + \omega \Delta t) = \sin \omega t \cos \omega \Delta t + \cos \omega t \sin \omega \Delta t$, причем косинус очень малого угла $\omega \Delta t$ равен единице ($\cos \omega \Delta t \approx 1$), а синус этого угла равен соответствующей дуге ($\sin \omega \Delta t \approx \omega \Delta t$).

На основании этого получим: $\Delta i = I_m (\sin \omega t + \omega \Delta t \cos \omega t - \sin \omega t) = I_m \omega \Delta t \cos \omega t$, скорость изменения синусоидального тока $\Delta i / \Delta t = I_m \omega \cos \omega t$ и пропорциональные этой скорости эдс самоиндукции и напряжение источника энергии $u = -e_L = I_m \omega L \cos \omega t = I_m \omega L \sin(\omega t + 90^\circ)$.

Векторная диаграмма показывает, что между током и эдс самоиндукции существует разность фаз (сдвиг фаз). Ток опережает эдс самоиндукции по фазе на угол $\varphi = 90^\circ$ (рис. 47, б).

Амплитуда эдс самоиндукции E_{Lm} пропорциональна скорости изменения тока во времени, в зависимости от угловой частоты ω и амплитуды переменного тока I_m выражается формулой $E_{Lm} = \omega L I_m$.

Из этой формулы видно, что при неизменной индуктивности L эдс самоиндукции увеличивается с возрастанием угловой частоты ω , т. е. с увеличением частоты переменного тока f .

Действующее значение эдс самоиндукции $E_L = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \omega L = \omega L I$, где I — действующее значение тока.

Поскольку эдс самоиндукции отстает по фазе от тока на угол 90° и напряжение, приложенное к зажимам катушки, преодолевает дейст-

вие эдс, т. е. направлено к ней противоположно, это напряжение опережает ток по фазе на угол 90° , что изображено на векторной диаграмме (рис. 48).

Векторная диаграмма показывает, что в цепи с индуктивностью без активного сопротивления напряжение, приложенное к этой цепи, опережает ток по фазе на угол $\varphi_1=90^\circ$, причем ток также опережает эдс самоиндукции по фазе на угол $\varphi_2=90^\circ$.

Действующее значение напряжения, приложенного к индуктивности, $U=\omega LI$, откуда $I=U/\omega L$.

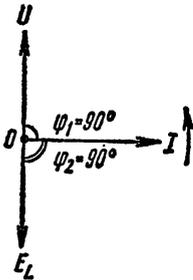
Полученная формула представляет собой выражение закона Ома для цепи переменного тока, обладающей индуктивностью. Величина ωL называется индуктивным сопротивлением, обозначается X_L и измеряется в омах. Итак

$$X_L = \omega L.$$

Как видно из этого выражения, индуктивное сопротивление возрастает с увеличением частоты тока.

§ 44. Цепь переменного тока, содержащая активное и индуктивное сопротивления

Рис. 48. Векторная диаграмма тока, напряжения и эдс самоиндукции для цепи с индуктивностью



Электрическая цепь с одним лишь индуктивным сопротивлением в действительности невозможна, так как всякая обмотка, помимо индуктивного сопротивления, обладает также активным сопротивлением. Поэтому рассмотрим случай, когда приемник, включенный в цепь переменного тока, имеет активное сопротивление R (рис. 49, а) и индуктивность

L , т. е. индуктивное сопротивление X_L .

Положим, что по цепи проходит переменный ток с частотой, соответствующей угловой частоте $\omega=2\pi f$, и с действующим значением I ,

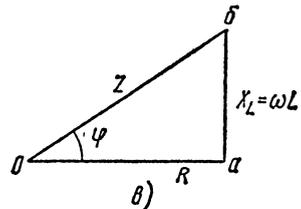
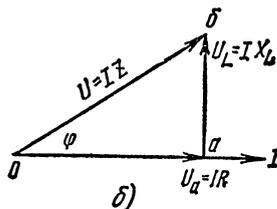
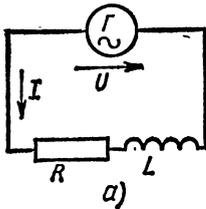


Рис. 49. Цепь переменного тока, содержащая активное сопротивление и индуктивность:

а — схема, б — векторная диаграмма, в — треугольник сопротивлений

что начальная фаза тока равна нулю и ток изображается вектором I (рис. 49, б), расположенным горизонтально.

Ток I , проходя по активному сопротивлению R , создает падение напряжения $U_a=IR$. Напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с током. Поэтому вектор напряжения U_a на диаграмме

построен по направлению вектора тока I . Напряжение U_a называется активным падением напряжения. Так как рассматриваемая нами цепь обладает и индуктивностью, то для преодоления эдс самоиндукции потребуются напряжение $U_L = IX_L$. Напряжение U_L называется индуктивным падением напряжения. Напряжение на индуктивности опережает по фазе ток на угол 90° . Поэтому вектор напряжения U_L построен под углом 90° в сторону опережения (против часовой стрелки).

Следовательно, напряжение на зажимах цепи равно геометрической сумме векторов $U_a = IR$ и $U_L = IX_L$. Сложив эти векторы геометрически, получим вектор напряжения U , определяющий своей величиной и направлением действующее значение напряжения генератора в цепи.

Вектор I отстает от вектора U на некоторый угол, обозначенный нами φ . Кроме того, вектор U является гипотенузой прямоугольного треугольника Oab , называемого треугольником напряжений. Катет треугольника Oa равен U_a , а катет ab равен U_L . Поэтому мы можем написать:

$$U^2 = U_a^2 + U_L^2 \text{ или } U^2 = (IR)^2 + (IX_L)^2 = I^2(R^2 + X_L^2).$$

Извлекая квадратный корень из обеих частей последнего равенства, находим:

$$U = I\sqrt{R^2 + X_L^2}, \text{ откуда } I = U/\sqrt{R^2 + X_L^2}.$$

Эта формула представляет собой выражение закона Ома для цепи переменного тока, содержащей активное и индуктивное сопротивление. Знаменатель в данном выражении обозначается Z и называется полным сопротивлением цепи: $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$.

Основываясь на этом равенстве, можно построить прямоугольный треугольник (рис. 49, *в*) с катетами R и $X_L = \omega L$ и гипотенузой Z , называемый треугольником сопротивлений цепи, содержащей активное и индуктивное сопротивления. Из треугольника сопротивлений можно определить угол сдвига фаз φ между напряжением, приложенным к цепи, и током в ней: $\cos \varphi = R/Z = R/\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$. Зная R и Z , нетрудно по $\cos \varphi$ определить угол φ .

§ 45. Емкость в цепи переменного тока

При включении конденсатора емкостью C (рис. 50, *а*) под постоянное напряжение U он заряжается и на его обкладках сосредотачиваются равные, но противоположные по знаку количества электричества: $Q = CU$.

Если заряженный конденсатор отключить от источника тока, то он, сохраняя заряд, будет обладать некоторым напряжением U_c . Соединив обкладки заряженного конденсатора между собой через какое-либо сопротивление R (рис. 50, *б*), можно убедиться (при помощи измерительного прибора) в том, что конденсатор, разряжаясь,

дает кратковременный ток через сопротивление R . Направление тока в цепи при разряде конденсатора противоположно направлению тока при заряде.

Если рассматривать процессы, происходящие в цепи, содержащей конденсатор и источник переменного тока с синусоидальным напряже-

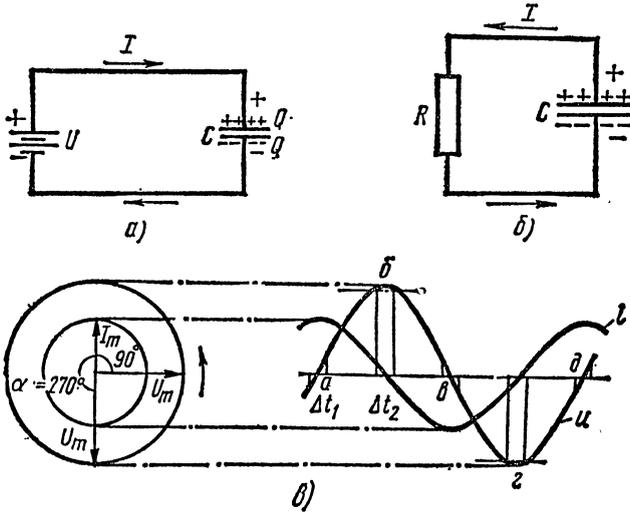


Рис. 50. Цепь, содержащая емкость:
 a — заряд конденсатора, $б$ — разряд конденсатора, $в$ — векторная и волновая диаграммы напряжения и тока

нием $u = U_m \sin \omega t$, то нетрудно заметить, что эти процессы сводятся к периодическому заряду и разряду конденсатора.

Положим, что генератор переменного тока замкнут на конденсатор. Представим изменение напряжения на зажимах генератора на временной диаграмме (рис. 50, в) в виде синусоидальной кривой $abвд$, а вектор напряжения U_m на векторной диаграмме расположим горизонтально.

Обратимся к формуле $Q = CU$ и применим ее к рассматриваемому нами случаю заряда конденсатора переменным током. Очевидно, что за очень малый промежуток времени Δt напряжение на зажимах генератора изменится также на малую величину, которую обозначим Δu . Вместе с тем за тот же промежуток времени Δt генератор отдает конденсатору количество электричества, равное ΔQ . Таким образом, наша формула для очень малого промежутка времени Δt может быть написана в виде $\Delta Q = C \Delta u$.

Деля обе части равенства на Δt , получим $\Delta Q / \Delta t = C \Delta u / \Delta t$.

Левая часть равенства представляет собой отношение количества электричества ΔQ , перешедшего от генератора к конденсатору за время Δt , к этому времени. Следовательно, если ΔQ выразить в кулонах, а Δt — в секундах, то отношение $\Delta Q / \Delta t$ представит собой количество электричества, перенесенное в одну секунду и выраженное

в кулонах, т. е. будет мгновенным значением тока i , выраженным в амперах.

Таким образом, последнее равенство можем написать в виде $i = C \Delta u / \Delta t$.

Если напряжение синусоидально $u = U_m \sin \omega t$, то за время Δt оно изменится на величину $\Delta u = U_m [\sin \omega (t + \Delta t) - \sin \omega t]$.

В этом выражении $\sin \omega (t + \Delta t) = \sin \omega t \cos \omega \Delta t + \sin \omega \Delta t \cos \omega t$, и так как угол $\omega \Delta t$ очень мал, то синус его равен дуге, а косинус — единице ($\sin \omega \Delta t = \omega \Delta t$, $\cos \omega \Delta t = 1$), на основании чего $\Delta u = U_m (\sin \omega t + \omega \Delta t \cos \omega t - \sin \omega t)$ и $\Delta u / \Delta t = U_m \omega \cos \omega t$.

Следовательно, через емкость проходит переменный ток $i = C \Delta u / \Delta t = U_m \omega C \cos \omega t = U_m \omega C \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right)$, т. е. ток синусоидален и опережает по фазе приложенное напряжение на четверть периода ($\pi/2 = 90^\circ$).

Максимальное значение переменного тока можно выразить через емкость: $I_m = U_m \omega C$.

Действующее значение тока в цепи, содержащей конденсатор,

$$I = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \omega C = U \omega C = U \left| \frac{1}{\omega C} \right|.$$

Полученная формула представляет собой выражение закона Ома для цепи переменного тока, обладающей емкостью. Величина $\frac{1}{\omega C}$ называется емкостным сопротивлением, обозначается X_C и измеряется в омах, т. е. $X_C = 1/\omega C$.

§ 46. Цепь переменного тока, содержащая активное и емкостное сопротивления

Положим, что по цепи (рис. 51, а), содержащей активное сопротивление R и конденсатор емкостью C , протекает переменный ток с угловой частотой ω и действующим значением I . Для простоты будем считать, что начальная фаза тока равна нулю и ток изображается вектором I (рис. 51, б), расположенным горизонтально.

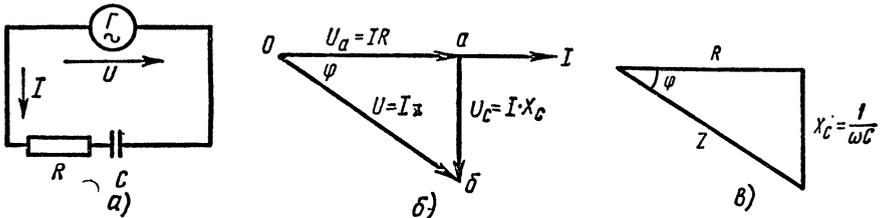


Рис. 51. Активное сопротивление и емкость в цепи переменного тока:
а — схема, б — векторная диаграмма напряжения и тока, в — треугольник сопротивлений

Ток I , проходя по активному сопротивлению R , создает падение напряжения $U_a = IR$. Напряжение на активном сопротивлении совпадает по фазе с током. Вектор напряжения U_a , как мы уже знаем, называется активным падением напряжения.

Поскольку рассматриваемая нами цепь помимо активного сопротивления обладает также и емкостным сопротивлением $X_C = 1/\omega C$, то ток I , проходя через конденсатор с указанным емкостным сопротивлением X_C , создает еще напряжение $U_C = IX_C$. Напряжение U_C называется емкостным падением напряжения. Как мы уже знаем, напряжение на конденсаторе отстает по фазе от тока в нем на угол 90° . Поэтому на векторной диаграмме вектор напряжения U_C построен повернутым под углом 90° в сторону отставания (по часовой стрелке).

Следовательно, напряжение на зажимах цепи должно быть равно геометрической сумме векторов U_a и U_C . Сложив эти векторы геометрически, получим вектор U , определяющий своей величиной и направлением действующее значение напряжения.

Вектор I опережает вектор U на некоторый угол, обозначенный нами φ . Кроме того, вектор U является гипотенузой прямоугольного треугольничка Oab , называемого треугольничком напряжений. Катет треугольничка Oa равен $U_a = IR$, а катет ab равен $U_C = IX_C$, т. е. $U^2 = U_a^2 + U_C^2$, или $U^2 = (IR)^2 + (IX_C)^2 = I^2(R^2 + X_C^2)$.

Извлекая квадратный корень из обеих частей последнего равенства, находим $U = I\sqrt{R^2 + X_C^2}$, откуда $I = U/\sqrt{R^2 + X_C^2} = U/\sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2}$.

Последняя формула представляет собой выражение закона Ома для цепи переменного тока, содержащей активное и емкостное сопротивление. Знаменатель в данном выражении, обозначаемый Z , называется полным сопротивлением цепи:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2}.$$

Основываясь на этом равенстве, мы можем построить прямоугольный треугольничок (рис. 51, *в*) с катетами R и $X_C = 1/\omega C$ и гипотенузой Z , называемый треугольничком сопротивлений цепи, содержащей активное и емкостное сопротивление. Из треугольничка сопротивлений можем определить угол сдвига фаз φ между током в цепи и напряжением, приложенным к ней:

$$\cos \varphi = R/Z = R/\sqrt{R^2 + (1/\omega C)^2}.$$

§ 47. Цепь переменного тока, содержащая активное, индуктивное и емкостное сопротивления

Рассмотрим цепь переменного тока, состоящую из включенных последовательно активного сопротивления R (рис. 52, *а*), индуктивности L и конденсатора емкостью C . Под действием приложенного напряжения U протекает ток I . Напряжение U должно покрыть (компенсировать) падение напряжения на активном сопротивлении $U_a = IR$, на индуктивном сопротивлении $U_L = I\omega L$ и на емкостном сопротивлении $U_C = I/\omega C$.

Построим векторную диаграмму для этих напряжений (рис. 52, *б*). Отложим ток I в виде горизонтального отрезка и по его направлению отложим активную составляющую напряжения $U_a = IR$, имея в виду, что она совпадает по фазе с током. Так как индуктивная составляющая

напряжения U_L опережает ток I по фазе на угол 90° , восстановим к направлению тока перпендикуляр и на нем отложим индуктивное падение напряжения $U_L = I\omega L$ в виде отрезка ab . Емкостное падение напряжения U_C отстает от тока I по фазе на угол 90° , поэтому из конца отрезка ab (из точки b) опустим к вектору тока перпендикуляр и на

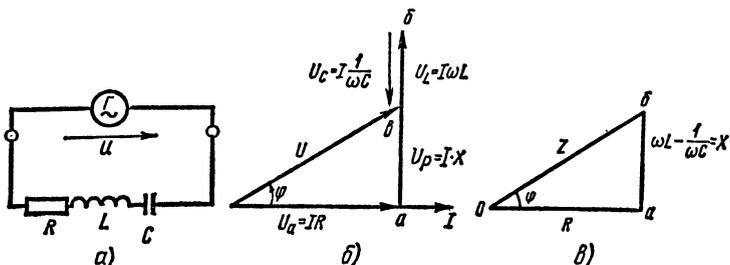


Рис. 52. Активное сопротивление, индуктивность и емкость в цепи переменного тока:

a — схема, b — векторная диаграмма, c — треугольник сопротивлений

нем отложим $U_C = I\omega C$ в виде отрезка bc . Соединив теперь точки O и b , получим суммарный вектор Ob , который своей величиной и направлением определит напряжение U , приложенное к рассматриваемой нами цепи.

Прямоугольный треугольник Oab называется треугольником напряжений для цепи, содержащей активное, индуктивное и емкостное сопротивления, соединенные последовательно. Катет ab представляет собой разность индуктивного U_L и емкостного U_C падения напряжения. Следовательно, можем написать такое равенство: $U^2 = U_a^2 + (U_L - U_C)^2$, или $U^2 = (IR)^2 + (I\omega L - I/\omega C)^2 = I^2 [R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2]$, откуда $U = I\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$ или $I = U/\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$.

Последняя формула представляет собой выражение закона Ома для цепи переменного тока, содержащей активное, индуктивное и емкостное сопротивления. Знаменатель в этом выражении обозначается Z и называется полным сопротивлением цепи:

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}.$$

Основываясь на данном равенстве, построим прямоугольный треугольник Oab (рис. 52, b) с катетами R и $\omega L - 1/\omega C$ и гипотенузой Z , называемый треугольником сопротивлений цепи, содержащей активное, индуктивное и емкостное сопротивления.

Из треугольника сопротивлений можем определить угол сдвига фаз (разность фаз) между напряжением и током в цепи:

$$\cos \varphi = R/Z = R/\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}.$$

Рассмотрим частный случай последовательного включения активного, индуктивного и емкостного сопротивлений, когда разность сопротивлений $X_L - X_C = \omega L - 1/\omega C$ равна нулю, т. е. $\omega L - 1/\omega C = 0$, или $\omega L = 1/\omega C$.

Решая уравнение относительно угловой частоты ω , величину которой для этого случая обозначим ω_0 , найдем $\omega_0^2 LC=1$, или $\omega_0=1/\sqrt{LC}$.

Угловая частота ω_0 называется резонансной угловой частотой. При этой частоте ток в цепи определяется одним лишь активным сопротивлением R , т. е. $I=U/R$ и достигает наибольшей величины.

Угол сдвига фаз между напряжением и током при резонансе становится равным нулю, так как $\cos \varphi=1$, а именно: $\cos \varphi=R/R=1$.

Рассмотренный нами случай называется резонансом напряжения U_C и индуктивного сопротивления U_L могут значительно превышать напряжение, приложенное к цепи. Напряжения U_L и U_C равны и сдвинуты по фазе на половину периода, т. е. в любой момент времени эти напряжения равны и противоположны по знаку. Следовательно, в любой момент времени мгновенные мощности в реактивных участках также равны и противоположны по знаку, т. е. увеличение энергии магнитного поля в катушке индуктивности происходит в результате уменьшения энергии электрического поля конденсатора, и наоборот, а генератор расходует энергию на активное сопротивление.

§ 48. Параллельное соединение реактивных сопротивлений. Резонанс токов

Положим, что две параллельные ветви подключены к зажимам генератора переменного тока Γ (рис. 53, а) с напряжением U . Одна ветвь обладает активным сопротивлением R_1 и индуктивностью L_1 , а другая — соответственно R_2 и L_2 .

Если угловая частота генератора ω , то полные сопротивления Z_1 и Z_2 первой и второй ветви равны:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2};$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}.$$

Токи I_1 и I_2 на основании закона Ома представляют собой следующие величины:

$$I_1 = U/Z_1 = U/\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2};$$

$$I_2 = U/Z_2 = U/\sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}.$$

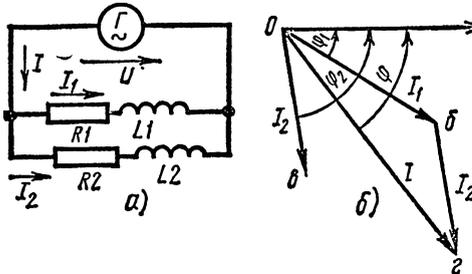


Рис. 53. Параллельное соединение сопротивлений:

а — схема, б — векторная диаграмма

Так как в каждой ветви помимо активных сопротивлений содержатся индуктивные сопротивления, то токи в ветвях отстают по фазе от напряжения U на углы φ_1 и φ_2 , определяемые по их косинусам из равенства $\cos \varphi_1=R_1/Z_1$; $\cos \varphi_2=R_2/Z_2$.

В соответствии с этим на рис. 53, б построена векторная диаграмма, на которой напряжение U показано в виде отрезка Oa , а токи I_1 и I_2 — в виде отрезков Ob и $Oв$.

Ток I в неразветвленной части цепи представляет собой геометрическую сумму токов I_1 и I_2 . Поэтому для определения тока I на диаграмме токи I_1 и I_2 сложены геометрически. В результате указанного сложения получен вектор тока I в виде отрезка Og , который своей величиной и направлением определяет величину и направление тока I в неразветвленной части цепи. Угол φ является углом сдвига фаз между напряжением U и током I .

Величину тока I и угла сдвига фаз φ можно найти вычислением. Для этого каждый из токов I_1 и I_2 раскладывают на два слагаемых, из которых одно будет направлено по вектору напряжения U (рис. 54), а другое — перпендикулярно ему. Первое из указанных слагаемых называют активной составляющей тока, а второе — реактивной составляющей тока. Обозначив составляющие тока I_1 — активную I_{1a} и реактивную I_{1p} , а составляющие тока I_2 — активную I_{2a} и реактивную I_{2p} , запишем:

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1; \quad I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1; \quad I_{2a} = I_2 \cos \varphi_2; \quad I_{2p} = I_2 \sin \varphi_2.$$

Ток в неразветвленной части цепи

$$I = \sqrt{(I_{1a} + I_{2a})^2 + (I_{1p} + I_{2p})^2} = \sqrt{I_a^2 + I_p^2},$$

где $I_a = I_{1a} + I_{2a}$ и $I_p = I_{1p} + I_{2p}$.

Величины I_a , I_p представляют собой соответственно активную и реактивную составляющие тока I в неразветвленной части цепи.

Косинус угла сдвига фаз φ между напряжением U и током I опре-

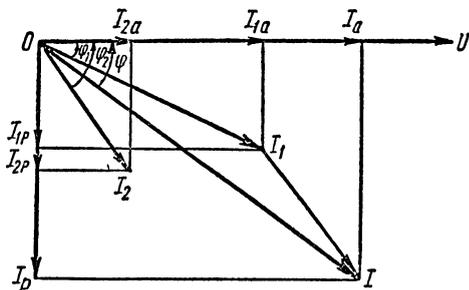


Рис. 54. Активное и реактивные составляющие токов

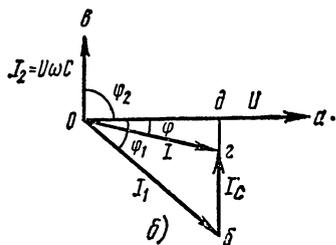
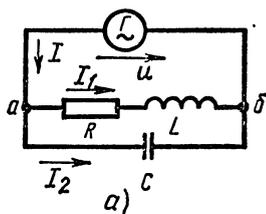


Рис. 55. Параллельное соединение индуктивности и емкости:

а — схема, б — векторная диаграмма

делится из равенства $\cos \varphi = I_a / I$.

Рассмотрим очень важный случай параллельного соединения двух ветвей, когда одна из них содержит активное сопротивление R и индуктивность L , а другая — конденсатор емкостью C (рис. 55, а).

Напряжение генератора G , приложенное к точкам a и b , равно U при угловой частоте ω . Очевидно, что в ветви с индуктивностью ток $I_1 = U/\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ и отстает по фазе от напряжения U на угол φ_1 .

В ветви с конденсатором ток $I_2 = U/\frac{1}{\omega C} = U\omega C$.

Ток I_2 опережает напряжение U по фазе на угол 90° , что показано на векторной диаграмме (рис. 55, б). По горизонтальной оси отложено напряжение в виде отрезка Oa . Под углом φ_1 в сторону отставания (по часовой стрелке от напряжения U) построен отрезок Ob , на котором отложен ток I_1 . Затем под углом $\varphi_2 = 90^\circ$ в сторону опережения (против часовой стрелки) от напряжения U построен отрезок $Oв$ и на нем отложен ток I_2 . Сложив геометрически векторы токов I_1 и I_2 , получим вектор тока I в неразветвленной части цепи. Отрезок Oz определяет величину тока I , а угол φ — угол сдвига фаз между напряжением U и током I в неразветвленной части цепи.

Из этой диаграммы видно, что если бы не было ветви с конденсатором C , подключенной параллельно ветви с активным сопротивлением R и индуктивностью L , то ток в цепи равнялся бы I_1 . Наличие же конденсатора C снизило ток в неразветвленной части цепи до величины $I < I_1$.

Если подобрать емкость C так, чтобы $Oв = bд$, т. е. чтобы $U\omega C = I_1 \sin \varphi_1$, то ток I в неразветвленной части цепи достигнет минимальной величины, а угол φ станет равным нулю. Такой случай называется **резонансом токов**.

Так как при резонансе токов в неразветвленной части цепи ток имеет минимальную величину, то потери в соединительных проводах и в обмотках генератора переменного тока минимальны. Подключение конденсатора параллельно цепи, обладающей активным и индуктивным сопротивлениями, повышает $\cos \varphi$.

При параллельном соединении конденсатора емкостью C и катушки с индуктивностью L и малым активным сопротивлением, которым можно пренебречь ($R=0$), токи в ветвях будут определяться следующим образом:

в ветви с индуктивностью $I_L = U/\omega L$;

в ветви с емкостью $I_C = U/\frac{1}{\omega C} = U\omega C$.

Подберем индуктивность L и емкость C так, чтобы токи I_L и I_C были равны, т. е. чтобы $U/\omega L = U\omega C$.

Отсюда определяем резонансную угловую частоту $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ и резонансную частоту $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$.

В ветви с емкостью ток I_C опережает напряжение U по фазе на угол 90° , а в ветви с индуктивностью ток I_L отстает от напряжения U по фазе на угол 90° . Ток I в неразветвленной части цепи равен нулю, так как токи I_C и I_L , одинаковые по величине, направлены противоположно. При идеальном резонансе ток в неразветвленной части цепи равен нулю, тогда входное сопротивление цепи, состоящей из параллельно соединенных индуктивности и емкости, равно бесконечно большой величине.

Если конденсатор зарядить до некоторого напряжения U и замк-

нуть на индуктивную катушку (рис. 56, а), то в замкнутом контуре возникнет ток и конденсатор будет разряжаться через катушку. При этом электрическая энергия, запасенная в конденсаторе, будет переходить в энергию магнитного поля катушки. В начальный момент, когда напряжение на конденсаторе велико, ток и магнитное поле катушки возрастают быстро. В индуктивности возникает эдс

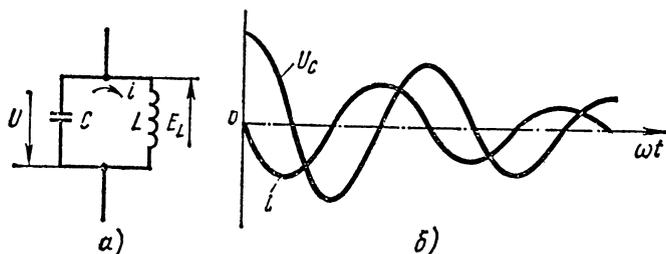


Рис. 56. Колебательный контур:
а — схема, б — временная диаграмма

самоиндукции E_L , уравнивающая напряжение U на конденсаторе. В процессе разряда конденсатора напряжение на нем понижается, и в момент, когда оно уменьшится до нуля, ток в контуре достигнет максимального значения, т. е. магнитное поле катушки станет наибольшим. Затем ток в цепи начнет уменьшаться, и эдс самоиндукции, изменив направление, будет заряжать конденсатор (с противоположной полярностью) до наибольшего значения эдс самоиндукции, соответствующего моменту, когда ток уменьшится до нуля. При этом энергия магнитного поля катушки вновь вернется к конденсатору. Затем опять начнется разряд конденсатора, но направление тока разряда будет противоположно начальному, так как напряжение на конденсаторе изменило полярность.

Таким образом, в цепи происходит процесс периодического изменения тока и напряжения с резонансной частотой $f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$ (рис. 56, б). Такая цепь называется **колебательным контуром**.

Ток в контуре и напряжение на нем с течением времени уменьшаются, так как помимо реактивных сопротивлений в цепи имеется и активное сопротивление провода, который является обмоткой индуктивной катушки. В активном сопротивлении провода выделяется энергия, преобразующаяся в тепло и нагревающая провод. Поэтому энергия, запасенная в конденсаторе и переходящая в энергию магнитного поля индуктивной катушки, а затем обратно в конденсатор, с каждым периодом постепенно убывает, что приводит к затуханию колебаний.

§ 49. Мощность переменного тока

Как известно, мощность постоянного тока определяется произведением напряжения и тока. При переменном токе как напряжение, так и ток периодически изменяются во времени. Следовательно, в любой момент времени мощность, равная произведению мгновенных зна-

чений напряжения и тока ($p=ui$), является также переменной величиной.

При активной нагрузке, когда сдвиг фаз между напряжением и током отсутствует ($\varphi=0$ или $\cos \varphi=1$), мощность представляет собой произведение действующих значений напряжения и тока и выражается в ваттах (или киловаттах, мегаваттах и т. д.), т. е. $P=UI$.

В цепи, содержащей активное сопротивление и индуктивность, ток

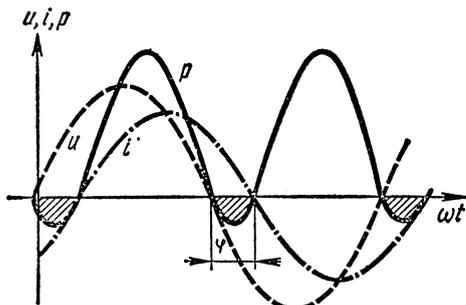


Рис. 57. График мгновенных значений напряжения, тока и мощности

образованию энергии электрической в энергию другого вида (механическую, световую, тепловую и т. д.).

Активная мощность $P=I^2R$.

Имея в виду, что $IR=U_a=U \cos \varphi$, получим: $P=UI \cos \varphi$, где U и I — действующие значения напряжения и тока; U_a — падение напряжения на активном сопротивлении.

Реактивная мощность накапливается индуктивностью при возрастании тока в цепи в виде энергии магнитного поля индуктивной катушки. При уменьшении тока в цепи энергия, накопленная в магнитном поле, преобразуется в электрическую и возвращается источнику энергии.

Произведение действующих значений U , I и $\sin \varphi$ называют реактивной мощностью $Q=UI \sin \varphi=I^2X$. Она измеряется в вольт-амперах (или киловольт-амперах) реактивных (В·Ар или кВ·Ар).

Реактивная мощность не потребляется приемником энергии и не участвует в процессе преобразования электрической энергии в энергию иного вида.

Произведение действующих значений напряжения и тока называется **полной мощностью** S , измеряемой в вольт-амперах или киловольт-амперах (В·А или кВ·А), т. е. $S=UI=\sqrt{P^2+Q^2}$.

Габариты электрических аппаратов и машин определяются полной мощностью, так как сечения обмоточных проводов зависят от тока, проходящего через них, а изоляция токопроводящих частей — от напряжения, под которым они находятся.

Отношение активной мощности к полной $P/S=UI \cos \varphi/UI=\cos \varphi$ показывает, какая доля полной мощности потребляется цепью, и называется коэффициентом мощности, равным косинусу угла сдвига фаз между напряжением и током. При активной нагрузке $\cos \varphi=1$ и $S=P$.

отстает по фазе от напряжения на угол φ (рис. 57) и мгновенное значение мощности оказывается как положительным, так и отрицательным, т. е. нагрузка потребляет энергию в одну часть периода и возвращает ее в сеть в другую часть периода.

Мощность переменного тока можно представить в виде активной и реактивной мощностей. Активная мощность потребляется активным сопротивлением, где происходит процесс пре-

Контрольные вопросы

1. Каково устройство простейшего генератора переменного тока?
2. Как определяют мгновенное и амплитудное значения эдс?
3. Объясните явление поверхностного эффекта.
4. Что называется действующим значением тока?
5. Каково соотношение между током и напряжением при индуктивной нагрузке?
6. Чему равно полное сопротивление цепи, содержащей активное сопротивление и индуктивность?
7. Каково соотношение между напряжением и током в цепи, содержащей емкость?
8. Чему равно полное сопротивление цепи, содержащей активное сопротивление и емкость?
9. Как определяется полное сопротивление цепи, содержащей R , L , C ?
10. Как определяются токи в параллельно соединенных приемниках энергии?
11. Поясните резонанс напряжений и резонанс токов.
12. Что такое активная, реактивная и полная мощности и в каких единицах они измеряются?

Глава V

ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 50. Трехфазные генераторы

Выше рассмотрены свойства однофазного переменного тока. Однако однофазная система неэкономична вследствие несовершенства однофазных электрических машин. Так, например, при одинаковых габаритах, массе активных материалов (стали и меди) и потерях энергии мощность однофазной машины в 1,5 раза меньше мощности трехфазной машины. Поэтому для электрификации используется трехфазная система переменного тока.

Трехфазной системой переменного тока или просто трехфазной системой называется цепь или сеть переменного тока, в которой действуют три эдс одинаковой частоты, но взаимно смещенные по фазе на одну треть периода. Отдельные цепи, составляющие трехфазную систему, называются фазами.

Если эдс во всех трех фазах имеют одинаковую амплитуду и сдвинуты по фазе на одинаковый угол, то такая система называется симметричной.

Впервые в мире передача энергии трехфазным током была осуществлена русским ученым М. О. Доливо-Добровольским в 1891 г.

На рис. 58 показана схема устройства простейшего двухполюсного трехфазного генератора. В пазах статора (неподвижная часть машины) расположены катушки $A-X$, $B-Y$ и $C-Z$, оси которых сдвинуты в пространстве на одну треть окружности (120°).

Рис. 58. Схема устройства простейшего трехфазного генератора

Внутри статора помещается ротор (вращающаяся часть машины), представляющий собой двухполюсный электромагнит, питаемый постоянным током, возбуждающим магнитное поле. Ротор приводится во вращение каким-либо двигателем. Магнитное поле, вращаясь вместе с ротором, пересекает проводники катушек, заложенных в пазах статора, и индуцирует в этих катушках эдс, изменяющиеся синусоидально. Однако синусоиды эдс фаз e_A , e_B и e_C будут сдвинуты одна по отношению к другой на $1/3$ периода.

На рис. 59 показаны кривые изменения эдс в катушках $A-X$, $B-Y$ и $C-Z$ и положения ротора, соответствующие положительному максимуму эдс E_m в этих катушках.

Действительно, пусть положительный максимум эдс E_m в катушке $A-X$ наступает в момент, когда сторона A окажется против центра северного полюса, а сторона X — против центра южного полюса. Положительный максимум эдс E_m в катушке $B-Y$ наступит в тот момент, когда центр северного полюса окажется под проводником B .

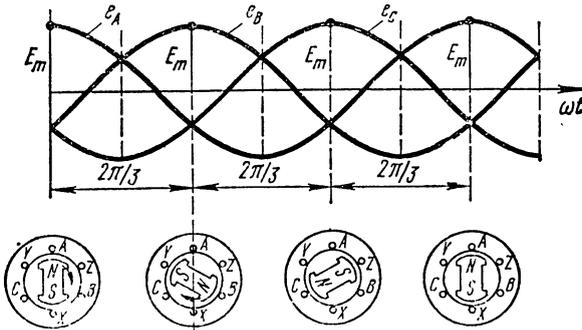


Рис. 59. Кривые изменения эдс в трехфазной обмотке генератора

Для этого ротор должен повернуться на $1/3$ окружности (120°), что соответствует промежутку времени, равному $1/3$ периода. Положительный максимум эдс E_m в катушке $C-Z$ наступит через $1/3$ периода после такого же максимума в катушке $B-Y$, что соответствует дальнейшему повороту ротора на $1/3$ окружности.

При нагрузке генератора на зажимах катушек $A-X$, $B-Y$ и $C-Z$ устанавливаются напряжения, называемые ф а з н ы м и. Если нагрузка отсутствует (холостой ход), фазные напряжения равны эдс, индуктируемому в катушках статора.

§ 51. Соединение обмоток генератора

В трехфазном генераторе (см. рис. 58) с тремя независимыми однофазными цепями их электродвижущие силы имеют одинаковые амплитуды и сдвинуты по фазе на $1/3$ периода. К каждой паре зажимов обмотки статора генератора можно подключить провода, подводящие ток к нагрузке, и получить несвязанную трехфазную систему (рис. 60, а). Обмотки генератора соединяют между собой в звезду или в треугольник.

При соединении обмоток генератора звездой (рис. 60, б) концы всех трех фаз соединяют в общую точку O , а к началам подсоединяют провода, отводящие энергию в сеть. Эти три провода называются л и н е й н ы м и, а напряжение между любыми двумя линейными проводами — л и н е й н ы м н а п р я ж е н и е м U_λ . От общей точки соединения концов (или начал) трех фаз (от нулевой точки звезды) может быть отведен четвертый провод, называемый н у л е в ы м. Напряжение между любым из трех линейных проводов и нулевым проводом равно напряжению между началом и концом одной фазы, т. е. фазному напряжению U_ϕ .

Обычно все фазы обмотки генератора выполняются одинаковыми, так что действующие значения эдс в фазах равны, т. е. $E_A = E_B = E_C$. Если в цепь каждой фазы генератора включить нагрузку, то по этим цепям будут проходить токи. В случае одинакового по величине и характеру сопротивления всех трех фаз приемника, т. е. при равномерной нагрузке, токи в фазах будут равны по величине и сдвинуты по фазе

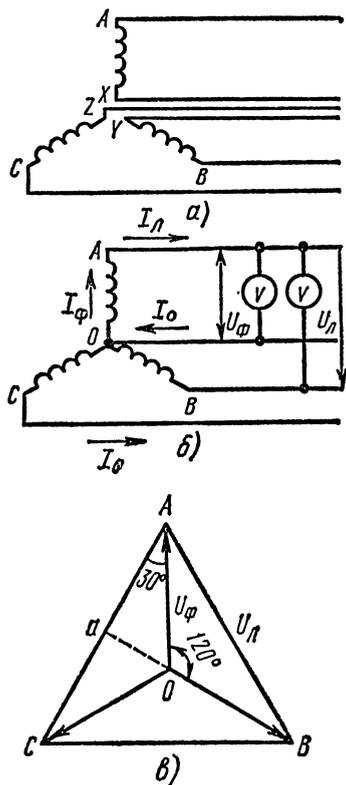


Рис. 60. Схемы соединения обмоток трехфазного генератора: *а* — несвязанной системы, *б* — соединение звездой, *в* — векторные диаграммы напряжений

На основании первого закона Кирхгофа ток в нулевом проводе равен геометрической сумме токов в фазах генератора $\vec{I}_0 = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C$.

При равномерной нагрузке токи в фазах генератора равны между собой и сдвинуты по фазе на $1/3$ периода. Геометрическая сумма токов трех фаз в таком случае равна нулю, т. е. в нулевом проводе тока не будет.

Поэтому при симметричной нагрузке нулевой провод может отсутствовать. При несимметричной нагрузке ток в нулевом проводе не равен нулю. Обычно нулевой провод имеет меньшее поперечное сечение, чем линейные провода.

относительно своих напряжений на один и тот же угол φ . Как максимальные, так и действующие значения фазных напряжений при равномерной нагрузке равны, т. е. $U_A = U_B = U_C$. Эти напряжения сдвинуты по фазе на 120° , как показано на векторной диаграмме (рис. 60, *в*). Напряжения между любыми точками схемы (см. рис. 60, *б*) соответствуют векторам (см. рис. 60, *в*) между теми же точками. Так, например, напряжение между точками *A* и *O* схемы (фазное напряжение U_A) соответствует вектору *A—O* диаграммы, а напряжение между линейными проводами *A* и *B* схемы — вектору линейного напряжения *A—B* диаграммы. По векторной диаграмме легко установить соотношение между линейным и фазным напряжениями. Из треугольника *AOa* можно записать следующее соотношение: $1/2 U_L = U_\phi \cos 30^\circ = U_\phi \sqrt{3}/2$, откуда

$$U_L = \sqrt{3} U_\phi \quad \text{или} \quad U_\phi = U_L / \sqrt{3},$$

т. е. при соединении обмоток симметричного генератора звездой линейное напряжение в $\sqrt{3} = 1,73$ раза больше фазного.

Из схемы (см. рис. 60, *б*) видно, что при соединении обмоток генератора звездой ток в линейном проводе равен току в фазах генератора, т. е. $I_L = I_\phi$.

При соединении обмоток генератора треугольником (рис. 61, а) начало каждой фазы соединяется с концом другой фазы. Таким образом, три фазы генератора образуют замкнутый контур. Так как эдс в фазах генератора равны и сдвинуты на $1/3$ периода по фазе, то геометрическая сумма их равна нулю и, следовательно, в замкнутом контуре трехфазной системы, соединенной треугольником, никакого тока при отсутствии внешней нагрузки не будет.

Линейные провода при соединении треугольником подключаются к точкам соединения начала одной фазы и конца другой. Напряжение между линейными проводами равно напряжению между началом и

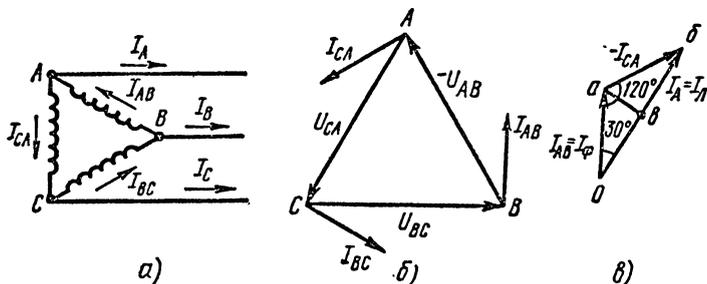


Рис. 61. Схема соединения обмоток генератора треугольником (а), векторные диаграммы напряжений и токов в фазах (б) и векторная диаграмма фазовых и линейных токов (в)

концом одной фазы. Таким образом, при соединении обмоток генератора треугольником линейное напряжение равно фазному, т. е. $U_{\text{л}} = U_{\phi}$.

При равномерной нагрузке в фазах обмоток генератора проходят равные токи, сдвинутые относительно фазных напряжений на одинаковые углы φ , т. е. $I_{AB} = I_{BC} = I_{CA}$.

Векторная диаграмма фазных напряжений и токов изображена на рис. 61, б. Приняв направление фазных и линейных токов за положительное, которое указано на рис. 61, а, на основании первого закона Кирхгофа для мгновенных значений токов можно написать следующие выражения:

$$i_A = i_{AB} - i_{CA}; \quad i_B = i_{BC} - i_{AB}; \quad i_C = i_{CA} - i_{BC}.$$

Так как токи синусоидальны, заменим алгебраическое вычитание мгновенных значений токов геометрическим вычитанием векторов, изображающих действующие значения токов:

$$\vec{I}_A = \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{CA}; \quad \vec{I}_B = \vec{I}_{BC} - \vec{I}_{AB}; \quad \vec{I}_C = \vec{I}_{CA} - \vec{I}_{BC}.$$

Ток I_A линейного провода А определится геометрической разностью векторов фазных токов \vec{I}_{AB} и \vec{I}_{CA} .

Для построения вектора линейного тока \vec{I}_A изобразим вектор фазного тока \vec{I}_{AB} на рис. 61, в в виде отрезка Oa , а из точки a построим

вектор $-\vec{I}_{CA}$ (отрезок ab), равный и противоположно направленный вектору \vec{I}_{CA} (см. рис. 61, б). Вектор, соединяющий начало вектора \vec{I}_{AB} (точка O) с концом вектора $-\vec{I}_{CA}$ (точка b), является вектором линейного тока \vec{I}_A .

Аналогично могут быть построены векторы линейных токов \vec{I}_B и \vec{I}_C .

Из векторной диаграммы, показанной на рис. 61, в, легко определить соотношение между линейными и фазными токами при соединении обмоток генератора в треугольник. Из треугольника Oab можно записать: $1/2 I_{\text{л}} = I_{\text{ф}} / \cos 30^\circ = I_{\text{ф}} \cdot \sqrt{3}/2$, откуда $I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}} = 1,73 I_{\text{ф}}$, т. е. при соединении обмоток генератора в треугольник линейный ток в $\sqrt{3}$ раз больше фазного (при равномерной нагрузке).

§ 52. Включение нагрузки в сеть трехфазного тока

В предыдущем параграфе было отмечено, что трехфазный ток передается четырех- или трехпроводной системой переменного тока. Потребители энергии могут быть включены в сеть по схеме «звезда» и по схеме «треугольник».

Приемники энергии, включенные в четырехпроводную систему звездой (рис. 62), одним проводом подсоединены к линейному проводу,

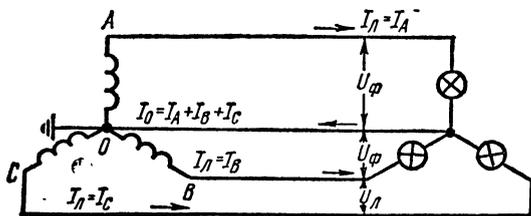


Рис. 62. Схема четырехпроводной системы

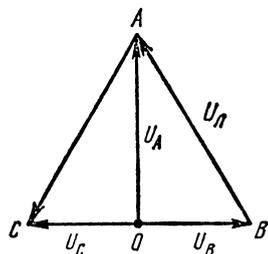


Рис. 63. Векторная диаграмма напряжений при неравномерной нагрузке и отсутствии нулевого провода

а другим — к нулевому. Выше мы установили, что при соединении обмоток в звезду в случае равномерной нагрузки соотношения между линейными и фазными значениями напряжений и токов таковы: $U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}}$ и $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$.

Ток нулевого провода, равный геометрической сумме токов трех фаз, т. е. $\vec{I}_0 = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C$, при равномерной нагрузке равен нулю. Следовательно, в нулевом проводе ток проходить не будет и надобность в нем отпадает. Поэтому трехфазные двигатели переменного тока при равномерной нагрузке включаются в сеть звездой без нулевого провода.

При неравномерной нагрузке ток в нулевом проводе не равен нулю, поэтому он обязателен в четырехпроводной системе, хотя его и выполняют обычно с меньшим, чем линейные провода, поперечным сечением. В случае отсутствия нулевого провода или его обрыва при неравномерной нагрузке возникает резкое изменение напряжения на фазах приемника. Так, если в фазе *A* нагрузки нет, а в фазах *B* и *C* нагрузки одинаковы, то при отсутствии нулевого провода нагрузки в фазах *B* и *C* окажутся включенными последовательно на линейное напряжение, которое равномерно распределится между ними (из условия равенства нагрузок). Следовательно, сопротивление нагрузок в фазах *B* и *C* окажется под напряжением, равным половине линейного напряжения (рис. 63), т. е. $U_B = U_C = U_{л}/2 = \sqrt{3}/2 \cdot U_{\phi}$. Нейтральная точка звезды сместится в точку *O* так, что напряжение фазы *A* нагрузки окажется равным $U_A = 1,5 U_{\phi}$.

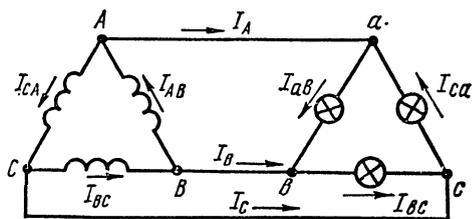


Рис. 64. Схема включения обмоток генератора и приемников в треугольник

Таким образом, отключение нулевого провода при неравномерной нагрузке недопустимо. Поэтому нулевой провод выполняется всегда «глухим», т. е. в нем не устанавливают предохранителей, выключателей и т. д.

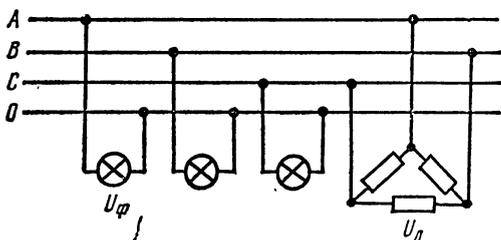


Рис. 65. Схема включения потребителей электроэнергии в четырехпроводную сеть на фазное и линейное напряжения

При включении приемников в сеть трехфазного тока по схеме треугольник каждая группа сопротивлений включается между двумя линейными проводами (рис. 64). Как выше было установлено, соотношения между линейными

и фазными значениями напряжений и токов при соединении приемников энергии в треугольник таковы: $U_{л} = U_{\phi}$ и $I_{л} = \sqrt{3} I_{\phi}$ при равномерной нагрузке.

Очень ценным свойством четырехпроводной системы является возможность получения двух различных напряжений. Включив приемники энергии между линейными проводами и нулевым проводом, соединяют их в звезду (рис. 65). Эти приемники окажутся включенными на фазное напряжение. Другую группу приемников соединим в треугольник так, что они будут включены только между линейными проводами и окажутся под линейным напряжением, большим в $\sqrt{3}$ раз фазного.

Четырехпроводная система широко используется для электро-

снабжения смешанных осветительно-силовых нагрузок. Осветительные нагрузки включаются на фазное напряжение, а силовые нагрузки (электродвигатели) — на линейное.

Для трехфазных систем справедливы соотношения, выведенные для однофазного переменного тока, $I_{\phi} = U_{\phi} / Z_{\phi}$; $\cos \varphi = R_{\phi} / Z_{\phi}$, где U_{ϕ} , Z_{ϕ} , R_{ϕ} — соответственно напряжение, полное и активное сопротивления рассматриваемой фазы.

§ 53. Защита трёхфазной сети предохранителями

Защита трехфазной сети от токов короткого замыкания и перегрузки осуществляется плавкими предохранителями, включенными в линейные провода (рис. 66).

Если от трехфазной сети имеется ответвление в виде однофазной двухпроводной линии, предохранители устанавливают в каждый токопроводящий провод.

Проверку исправности и обнаружение поврежденного предохранителя производят контрольной лампой или неоновым индикатором.

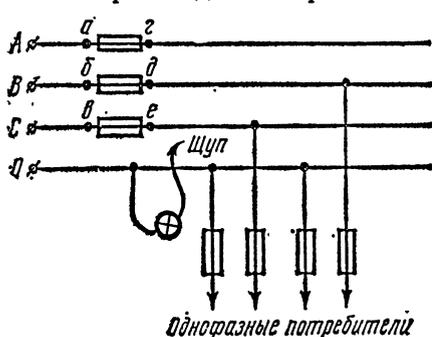


Рис. 66. Схема проверки исправности предохранителей контрольной лампой

В первом случае один конец контрольной лампы подключают к нулевому проводу и щупом дотрагиваются до контактов а, б и в. Если лампа каждый раз будет загораться, то напряжение есть во всех фазах. Дотрагиваясь щупом до контактов г, д, е, проверяют предохранители в фазах А, В, С. Если при подключении щупа к какому-либо контакту лампа не загорается, значит неисправен предохранитель в этой фазе. Такой предохранитель необходимо заменить.

Проверку предохранителей с помощью неоновой лампы производят аналогичным образом. Неоновый индикатор (рис. 67) представляет собой малогабаритную неоновую лампу, вмонтированную в пластмассовый корпус, изготовленный в виде пишущей ручки. Неоновая лампа 3 одним концом подключена к контактной лепестку 4, а другим через резистор 1,2 МОм — к щупу 1. Для проверки предохранителей индикатор берут в руки так, чтобы один из пальцев касался контактного лепестка 4 (это необходимо для создания цепи, проходящей через емкость, образованную между человеческим телом и землей). Щупом дотрагиваются сначала до контактов а, б, в, а затем до контактов г, д, е предохранителя. Если лампа индикатора не загорается при касании щупом какого-либо контакта, то предохранитель в данной фазе неисправен и должен быть заменен.

Если приемники энергии включены на фазные напряжения (между линейным и нулевым проводами), то при перегорании линейного предохранителя отключится нагрузка в одной фазе, тогда как в двух

других фазах нагрузки будут оставаться под фазным напряжением и будут работать нормально. При включении потребителей на линейное напряжение (между линейными проводами) в трех- или четырехпроводную трехфазную сеть перегорание линейного предохранителя приведет к последовательному включению двух приемников на линейное напряжение и напряжение на каждом приемнике окажется меньше номинальной величины.

Линейные напряжения в трехфазных сетях отличаются от фазных в $\sqrt{3}=1,73$ раза и определять фазные и линейные напряжения можно без вольтметра с помощью контрольной лампы небольшой мощности (15—25 Вт). Такие лампы выдерживают значительные кратковременные перенапряжения и взрывобезопасны. Обычно контрольные лампы выбирают на номинальное напряжение 220 В.

§ 54. Мощность трехфазной цепи

Мощность, потребляемая нагрузкой от сети трехфазного тока, равна сумме мощностей в отдельных фазах, т. е. $P=P_A+P_B+P_C$.

При равномерной нагрузке мощность, потребляемая каждой фазой,

$$P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi,$$

где U_{ϕ} — фазное напряжение; I_{ϕ} — фазный ток; $\cos \varphi$ — коэффициент мощности нагрузки.

Мощность, потребляемая всеми тремя фазами, $P=3 \cdot U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi$.

При соединении приемников энергии в звезду соотношения между линейными и фазными значениями напряжений и токов таковы: $U_{\text{л}}=\sqrt{3}U_{\phi}$ и $I_{\text{л}}=I_{\phi}$. Следовательно, мощность, потребляемая нагрузкой от трехфазной сети, $P=3 \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} I_{\text{л}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi$.

При соединении приемников энергии в треугольник соотношения между линейными и фазными значениями напряжений и токов таковы: $U_{\text{л}}=U_{\phi}$ и $I_{\text{л}}=\sqrt{3}I_{\phi}$.

Следовательно, мощность, потребляемая нагрузкой,

$$P = 3U_{\text{л}} \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi.$$

Таким образом, при равномерной нагрузке мощность, потребляемая от трехфазной сети, независимо от способа включения нагрузки, выражается следующей формулой:

$$P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi.$$

Для измерения мощности применяют специальные измерительные приборы, называемые **ваттметрами**. При симметричной или

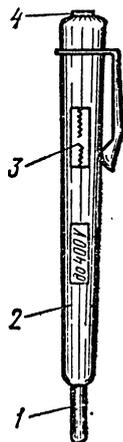


Рис. 67. Неоновый индикатор:
1 — щуп, 2 — корпус, 3 — неоновая лампа, 4 — контактный лепесток

равномерной нагрузке мощность, потребляемая от трехфазной системы, может быть определена одним однофазным ваттметром. В четырехпроводной системе (с нулевым проводом) токовая обмотка ваттметра включается последовательно в один из линейных проводов, а обмотка напряжения — между теми же линейным и нулевым проводами (рис. 68, а). При таком включении ваттметр показывает мощность в одной фазе P_ϕ , а так как при равномерной нагрузке мощности фаз одинаковы, то суммарная мощность трехфазной системы $P=3 P_\phi$.

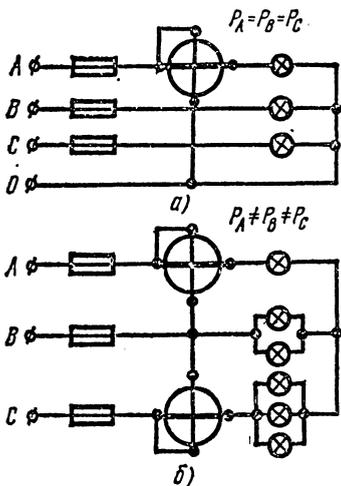


Рис. 68. Схемы измерения мощности в трехфазной системе: а — в четырехпроводной сети при равномерной нагрузке, б — в трехпроводной сети при неравномерной нагрузке

В трехпроводной системе при несимметричной нагрузке наиболее часто используют схему двух ваттметров (рис. 68, б), которая не может быть применена в четырехпроводной системе. В схеме двух ваттметров обмотки напряжения каждого ваттметра соединены с входным зажимом обмотки тока и линейным проводом, оставшимся свободным. Полная мощность трехфазной системы равна сумме показаний ваттметров, т. е. $P=P_1+P_2$.

При больших углах сдвига фаз между напряжением и током показания одного из ваттметров могут оказаться отрицательными, и для измерения мощности следует изменить направление тока в обмотке, переключив ее. В этом случае суммарная мощность равна разности показаний ваттметров, т. е. $P=P_1-P_2$.

Энергия в трехфазной системе измеряется как однофазными, так и трехфазными счетчиками электрической энергии. Однофазные счетчики включают в трехфазную сеть так же, как и ваттметры.

Трехфазные счетчики состояются из двух или трех однофазных счетчиков, размещенных в одном корпусе и имеющих общий счетный механизм, и называются соответственно двухэлементными или трехэлементными. В трехпроводной системе (без нулевого провода) применяют двухэлементные, а в четырехпроводной системе (с нулевым проводом) — трехэлементные счетчики. Схема включения счетчика электрической энергии указывается на съемной крышке, которой закрывается панель зажимов.

§ 55. Вращающееся магнитное поле

Действие многофазной машины переменного тока основано на использовании вращающегося магнитного поля. Вращающееся магнитное поле создает любая многофазная система переменного тока, т. е. система с числом фаз две, три и т. д.

Выше было отмечено, что наибольшее распространение получил трехфазный переменный ток. Поэтому рассмотрим вращающееся магнитное поле трехфазной обмотки машины переменного тока.

На рис. 69, *а* и *б* показана простейшая трехфазная обмотка, включенная в сеть трехфазного тока. В статоре, собранном из листовой стали, как это делается во всех машинах переменного тока, расположены три обмотки, оси которых сдвинуты взаимно на угол 120° . Каждая обмотка для наглядности изображена состоящей из одного витка, находящегося в двух пазах статора. В действительности обмотки имеют большое число витков. Буквами *A*, *B*, *C* обозначены начала обмоток, а буквами *X*, *Y*, *Z* — их концы. Обмотки соединяют звездой или треугольником.

По обмоткам проходят синусоидальные токи с одинаковыми амплитудами (I_m) и одинаковой частотой (ω), фазы которых смещены на $1/3$ периода (рис. 69, *в*). Токи, проходящие в катушках, возбуждают переменные магнитные поля, которые пронизывают обмотки в направлении, перпендикулярном их плоскостям. Следовательно, средняя магнитная линия или ось магнитного поля, создаваемого катушкой *A—X*, направлена под углом 90° к плоскости этой катушки (см. рис. 69, *б*). Направления магнитных полей всех трех катушек показаны векторами B_A , B_B и B_C , сдвинутыми друг относительно друга также на 120° .

Условимся считать положительными направления токов в катушках от начала к концу обмотки каждой фазы. При этом в проводниках статора, подключенных к начальным точкам *A*, *B* и *C*, токи будут направлены на зрителя, а в проводниках, подключенных к конечным точкам *X*, *Y*, *Z*, — от зрителя.

Положительным направлениям токов соответствуют положительные

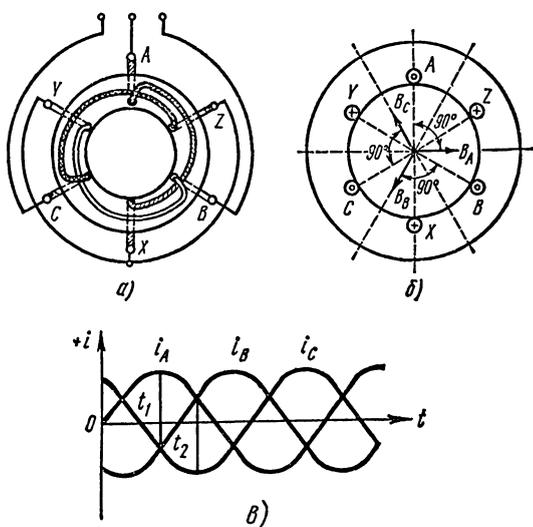


Рис. 69. Простейшая трехфазная обмотка:
а — схема, *б* — разрез, *в* — кривые изменения токов в фазах

ные направления магнитных полей, показанные на том же рис. 69, б и определяемые по правилу буравчика.

Направление результирующего магнитного поля, созданного трехфазной обмоткой, для различных моментов времени определим следующим образом. В момент времени $t=0$ ток в обмотке $A-X$ равен

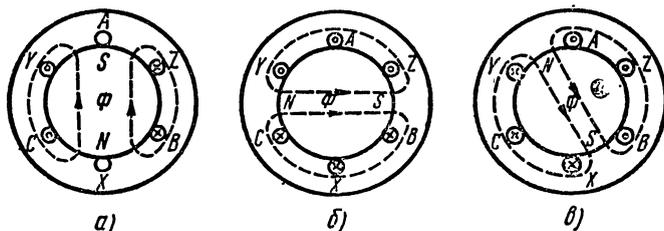


Рис. 70. Магнитное поле трехфазной обмотки в различные моменты времени:

$a - t=0, б - t=t_1, в - t=t_2$

нулю, в обмотке $B-Y$ — отрицателен, в обмотке $C-Z$ — положителен. Следовательно, в этот момент тока в проводниках A и X нет, в проводниках C и Z он имеет положительное направление, в проводниках B и Y — отрицательное направление (рис. 70, а). Таким образом, в выбранный нами момент $t=0$ в проводниках C и Y ток направлен на зрителя, а в проводниках B и Z — от зрителя. При таком

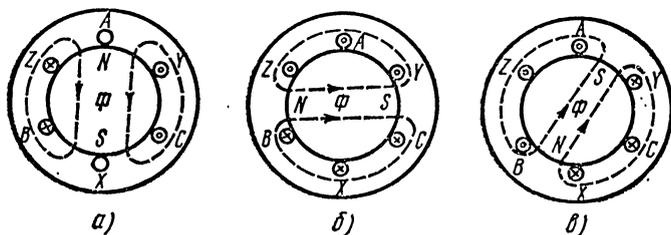


Рис. 71. Магнитное поле трехфазной обмотки в различные моменты времени после изменения чередования фаз:

$a - t=0, б - t=t_1, в - t=t_2$

направлении тока согласно правилу буравчика созданное магнитное поле направлено снизу вверх, т. е. в нижней части внутренней окружности статора находится северный полюс, а в верхней — южный.

В момент t_1 в фазе A ток положителен, в фазах B и C — отрицателен. Следовательно, в проводниках Z, A и Y токи направлены на зрителя, а в проводниках C, X и B — от зрителя (рис. 70, б) и магнитное поле повернуто на 90° по часовой стрелке относительно своего начального направления.

В момент t_2 токи в фазах A и B положительны, а в фазе C ток отрицателен. Следовательно, в проводниках A, Z и B токи направлены на зрителя, а в проводниках Y, C и X — от зрителя и магнитное поле

повернуто еще на больший угол относительно начального направления (рис. 70, в).

Таким образом, во времени происходит непрерывное и равномерное изменение направления магнитного поля, созданного трехфазной обмоткой, т. е. магнитное поле вращается с постоянной скоростью. В нашем случае вращение магнитного поля происходит по часовой стрелке.

Если изменить чередование фаз трехфазной обмотки, т. е. изменить подключение к сети любых двух из трех обмоток, то изменится и направление вращения магнитного поля. На рис. 71 показана трехфазная обмотка, у которой изменено подключение обмоток *B* и *C* к сети. Если рассмотреть магнитные поля для ранее выбранных моментов времени $t=0$, $t=t_1$ и $t=t_2$, то видно, что магнитное поле вращается теперь против часовой стрелки.

Магнитный поток, создаваемый трехфазной системой переменного тока в вышеописанной симметричной системе обмоток, является величиной постоянной и в любой момент времени равен полуторному значению максимального потока одной фазы, т. е. $\Phi = \frac{3}{2} \Phi_m$. Это можно доказать, определив результирующий магнитный поток Φ для любого момента времени.

Например, для момента t_1 , когда $\omega t_1 = 90^\circ$, токи в катушках имеют такое значение: $i_A = I_m \sin 90^\circ = I_m$; $i_B = I_m \sin (90 - 120)^\circ = -\frac{I_m}{2}$; $i_C = I_m \sin (90 - 240)^\circ = -\frac{I_m}{2}$.

Следовательно, магнитный поток Φ_A обмотки *A* в выбранный момент имеет наибольшее значение и направлен по оси этой обмотки в положительном направлении (рис. 72). Магнитные потоки обмоток *B* и *C* вдвое меньше максимального и отрицательны, т. е. направлены отрицательно вдоль осей этих обмоток.

Найдем геометрическую сумму потоков Φ_A , Φ_B и Φ_C .

Например, для момента времени t_1 результирующий магнитный поток $\Phi_p = \Phi_A + \Phi_B \cos 60^\circ + \Phi_C \cos 60^\circ$, так как в этот момент результирующий поток совпадает с потоком Φ_A и сдвинут относительно потоков Φ_B и Φ_C на 60° .

Имея в виду, что в момент t_1 магнитные потоки обмоток принимают значения $\Phi_A = \Phi_m$, $\Phi_B = \Phi_C = \frac{1}{2} \Phi_m$, результирующий магнитный поток можно выразить так:

$$\Phi_p = \Phi_m + \frac{1}{2} \Phi_m \cos 60^\circ + \frac{1}{2} \Phi_m \cos 60^\circ = \frac{3}{2} \Phi_m.$$

В момент $t=0$ результирующее магнитное поле было направлено по вертикальной оси (см. рис. 70, а). За время, равное одному периоду изменения тока в катушках, магнитный поток повернется на один

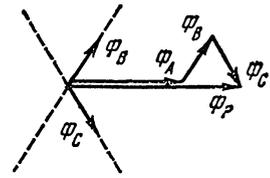


Рис. 72. Результирующий магнитный поток трехфазной обмотки

полный оборот в пространстве и будет вновь направлен по вертикальной оси так же, как и в момент $t=0$.

Если частота тока f , т. е. ток претерпевает f изменений в одну секунду, то магнитный поток трехфазной обмотки совершит f оборотов в секунду или $60 f$ оборотов в минуту, т. е. $n=60f$, где n — частота вращения магнитного поля в минуту.

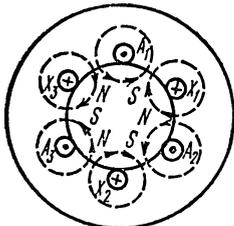


Рис. 73. Схема обмотки статора многополюсной машины

Мы рассмотрели простейший случай, когда обмотка имеет одну пару полюсов.

Если обмотку статора выполнить так, что провода каждой фазы будут состоять из 2, 3, 4 и т. д. одинаковых групп, симметрично расположенных по окружности статора, то число пар полюсов будет соответственно 2, 3, 4 и т. д.

На рис. 73 показана обмотка одной фазы, состоящая из трех симметрично расположенных по окружности статора катушек и образующая шесть полюсов или три пары полюсов.

В многополюсных обмотках магнитное поле за один период изменения тока поворачивается на угол, соответствующий расстоянию между двумя одноименными полюсами. Таким образом, если обмотка имеет 2, 3, 4 и т. д. пары полюсов, то магнитное поле за один период изменения тока поворачивается на $1/2$, $1/3$, $1/4$ и т. д. часть окружности статора. Обозначив буквой p число пар полюсов, найдем путь, пройденный магнитным полем за один период изменения тока. Этот путь равен $1/p$ части окружности статора. Следовательно, частота вращения в минуту магнитного поля обратно пропорциональна числу пар полюсов, т. е.

$$n = \frac{60f}{p}.$$

Итак, частота вращения магнитного поля в минуту постоянна и равна частоте тока, умноженной на 60 и деленной на число пар полюсов.

Контрольные вопросы

1. Как устроен трехфазный генератор?
2. Объясните схемы соединения обмоток генератора.
3. К чему приведет обрыв нулевого провода при несимметричной нагрузке?
4. Как обнаружить неисправный предохранитель в трехфазной сети?
5. Чему равна мощность, потребляемая нагрузкой от трехфазной сети при симметричной и несимметричной нагрузках?
6. Как измеряют мощность и энергию трехфазной системы при симметричной и несимметричной нагрузках?
7. Как определяется частота вращения магнитного поля, возбуждаемого трехфазной симметричной системой обмоток?

Глава VI

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

§ 56. Общие сведения и классификация приборов

При эксплуатации электросиловой аппаратуры измеряют ток, напряжение, сопротивление, мощность, частоту и расход электрической энергии. Для этой цели применяют различные электроизмерительные приборы.

Измерение — это определение физической величины опытным путем с помощью измерительных приборов.

В большинстве электроизмерительных приборов имеется подвижная и неподвижная части. Подвижная часть, включающая в себя катушку или стальную якорь, механически объединена со стрелочным указателем и возвратными пружинами из фосфористой бронзы.

Принцип действия измерительных приборов независимо от их назначения сводится к следующему: электрический ток, проходя через прибор, вызывает появление вращающего момента, под воздействием которого преодолевается противодействие спиральных пружин 2 и подвижная часть поворачивается на определенный угол α (рис. 74). При этом стрелка 3, переместившись по шкале 4, укажет измеряемую величину. Когда прибор отключается, вращающий момент исчезает и подвижная часть вследствие упругости пружин возвращается в исходное положение.

При изменении температуры окружающей среды упругость возвратных пружин меняется, что приводит к некоторому повороту подвижной части. Однако перед началом измерений стрелка прибора должна располагаться против исходного (нулевого) деления шкалы. Такую установку стрелки производят с помощью корректора 1.

По условиям эксплуатации подвижная система прибора должна быстро успокаиваться, что обеспечивается применением воздушного или магнитного успокоителя. В воздушном успокоителе (рис. 75, а)

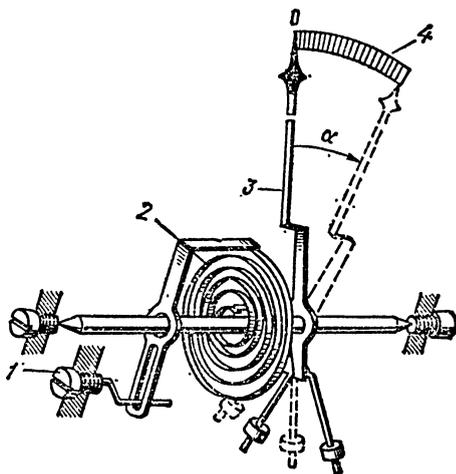


Рис. 74. Устройство подвижной части электроизмерительного прибора:

1 — корректор, 2 — возвратная пружина, 3 — стрелка, 4 — шкала

используется торможение подвижной системы вследствие сжатия или разрежения воздуха в камере успокоителя, а в магнитном (рис. 75, б) — применен принцип магнитного торможения (под действием вихревых токов $i_{в}$). Для уменьшения трения и повышения точности ось подвижной системы в некоторых приборах крепят на кернах в подпятниках из камней высокой твердости (рубина, сапфира, агата).

Измерительные приборы различают по назначению, роду измеряе-

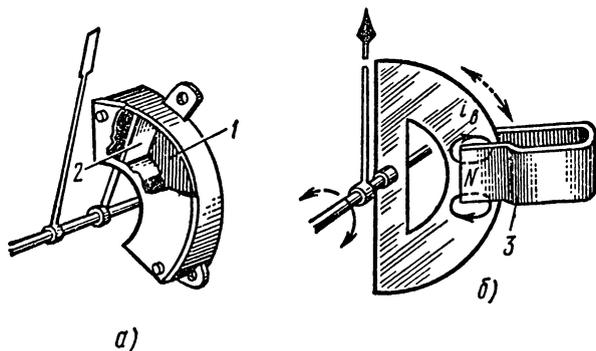


Рис. 75. Устройство успокоителей:

а — воздушного, б — магнитного; 1 — камера воздушного успокоителя, 2 — поршень, 3 — постоянный магнит

мого тока, принципу действия, классу точности, а также форме корпуса, положению при измерениях и характеру применения.

По назначению приборы подразделяются на амперметры, вольтметры, омметры, ваттметры, счетчики, частотомеры и др.

Измерительные приборы можно применять в цепях переменного или постоянного тока. Однако существуют приборы, предназначенные для включения в цепь и переменного и постоянного токов.

По принципу действия электроизмерительные приборы относят к следующим наиболее распространенным системам: электромагнитной, магнитоэлектрической, электродинамической, индукционной, электростатической, термоэлектрической и вибрационной.

В связи с тем, что абсолютно точных приборов нет, показания приборов несколько отличаются от действительного значения измеряемой величины. Разность между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины называется **абсолютной погрешностью**.

Так, например, если напряжение источника 100 В, а вольтметр со шкалой 150 В, включенный в данную цепь, показывает 103 В, то абсолютная погрешность $\Delta A = U_{\text{приб}} - U_{\text{ист}} = 103 - 100 = 3$ В.

Отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины называется **относительной погрешностью прибора**:

$$\gamma_{\text{от}} = \Delta A / A \cdot 100\%.$$

Если абсолютная погрешность 3 В, а измеряемая величина 50

и 100 В, то относительная погрешность составит: для первого измерения $\frac{3}{50} \cdot 100 = 6\%$; для второго измерения $\frac{3}{100} \cdot 100 = 3\%$.

Отсюда следует, что относительная погрешность в начале шкалы прибора больше, чем в конце. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе предела измерений в универсальных измерительных приборах (авометрах). Наименьшая погрешность в измерениях будет при использовании последней трети шкалы прибора.

Таким образом, точность стрелочных измерительных приборов (самых распространенных) оценивать по их относительной погрешности неудобно, так как абсолютная погрешность у них примерно одинакова вдоль всей шкалы и, следовательно, с уменьшением измеряемой величины быстро растет относительная погрешность. Для оценки точности стрелочных измерительных приборов служит их приведенная погрешность, равная отношению абсолютной погрешности показания ΔA к значению, соответствующему наибольшему (номинальному) показанию прибора A_n , выраженному в процентах, т. е. $\gamma_{пр} = \frac{\Delta A}{A_n} \cdot 100$.

В нашем случае абсолютная погрешность 3 В, наибольшее показание прибора 150 В и приведенная погрешность $\gamma_{пр} = \frac{3}{150} \cdot 100 = 2\%$. Приведенная погрешность при нормальных эксплуатационных условиях (температура $+20^\circ\text{C}$, правильная установка, отсутствие внешних магнитных полей и больших ферромагнитных масс) называется основной погрешностью прибора. По степени точности измерительные приборы делятся на 8 классов (ГОСТ 1845—59): 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 и 4. Цифры указывают основную погрешность в процентах.

Приборы классов точности 0,05 и 0,1 считаются контрольными; 0,2 и 0,5 — лабораторными; 1; 1,5; и 2,5 — техническими; 4 — учебными.

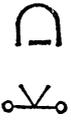
Контрольные приборы имеют зеркальную шкалу и ножевидную стрелку. У лабораторных приборов есть ножевидная стрелка, но может не быть зеркальной шкалы. Технические и учебные приборы имеют копьевидную стрелку, но нет зеркальной шкалы.

Зеркальная шкала, представляющая собой пластину посеребренного стекла, расположенную под дугообразным вырезом шкалы, обеспечивает высокую точность снятия показаний прибора. При определении показаний приборов, имеющих зеркальную шкалу, глаз наблюдателя должен быть расположен так, чтобы стрелка закрывала свое изображение в зеркальной шкале.

По форме корпуса приборы бывают круглые, квадратные, прямоугольные и секторообразные; по характеру применения — стационарные (жестко укрепленные на месте установки) и переносные, а по положению при измерении — вертикальные (\perp), горизонтальные ($-$) или устанавливаемые под некоторым углом ($<$).

Промышленность выпускает электроизмерительные приборы трех эксплуатационных групп: А, Б и В, характеризующих допустимую

Таблица 3. Условные знаки на шкалах электроизмерительных приборов

Система прибора	Условное обозначение	Знак на шкале прибора	Пояснение
Электромагнитная		Род тока   	Постоянный ток Переменный ток Трехфазный ток
Магнитоэлектрическая			
Электродинамическая			
Индукционная		<i>Зажимы</i>   	Общий зажим Зажим, соединенный с корпусом Зажим для заземления
Вибрационная			
Выпрямительная		Установка прибора   	Вертикальное Горизонтальное Под углом
Термоэлектрическая			
Ферродинамическая		Прочность изоляции прибора 	Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением 2 кВ
Электростатическая			

температуру окружающей среды, при которой можно эксплуатировать данный прибор. Приборы различных групп могут эксплуатироваться при следующих температурах окружающей среды: группа А 0—(+35)°С; группа В (—30)—(+40)°С; группа В₁ (—40)—(+50)°С; группа В₂ (—50)—(+60)°С. Принадлежность прибора к эксплуатационным группам В и В₂ указывается на шкале. Приборы эксплуатационной группы А обычно обозначений на шкале не имеют.

Условные обозначения приборов показаны в табл. 3.

На шкале измерительных приборов условными значками и цифрами указываются следующие данные: род тока, для которого предназначен прибор, система прибора, напряжение изоляции, положение при измерениях, класс точности, а также год выпуска, номер прибора и его принадлежность к эксплуатационной группе. Так, например, измерительному прибору, шкала которого изображена на рис. 76, можно дать следующую техническую характеристику: вольтметр (V) для измерения переменного напряжения (~) в пределах от 0 до 150 В,

электромагнитной системы () вертикального положения (\perp)

класса точности 1,0. Изоляция прибора испытана на напряжение 2 кВ (), год выпуска 1975, заводской номер 3275, эксплуатационная

группа В ().

При эксплуатации приборов необходимо соблюдать следующие основные правила: перед включением прибора стрелку при помощи корректора надо установить на нулевое деление шкалы; прибор включать только в цепь того рода тока, для которого он предназначен, а при измерениях корпус прибора должен занимать положение, соответствующее его нормальной установке.

§ 57. Приборы электромагнитной системы

Электромагнитные измерительные приборы применяют для измерения тока или напряжения в цепях переменного или постоянного тока. Промышленность выпускает приборы данного типа в двух вариантах: с плоской и круглой катушкой. Действие электромагнитного прибора с плоской катушкой основано на принципе втягивания ферромагнитного сердечника в катушку с током. Такой прибор представляет собой катушку 1 (рис. 77), намотанную на каркас, имеющий щелевидное отверстие. Подвижная часть прибора содержит ось со стрелкой, несимметрично укрепленный сердечник 2 и возвратную пружину 3. Для быстрого успокоения стрелки относительно положения равновесия служит успокоитель с воздушным торможением 4.

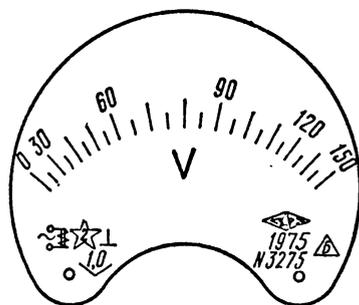


Рис. 76. Шкала вольтметра

При включении прибора в сеть по катушке проходит ток и возникающее магнитное поле втягивает сердечник внутрь катушки. Сердечник укреплен на оси несимметрично, поэтому подвижная часть прибора поворачивается на некоторый угол. Подвижная часть будет поворачиваться до тех пор, пока вращающий момент, созданный током, не будет уравновешен противодействующим моментом спиральной пружины.

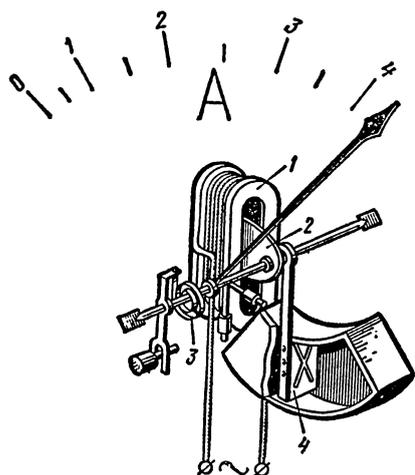


Рис. 77. Устройство электромагнитного прибора с плоской катушкой:

1 — катушка, 2 — сердечник, 3 — возвратная пружина, 4 — успокоитель

Угол поворота подвижной части зависит от силы, с которой сердечник втягивается внутрь катушки. Эта сила пропорциональна току и величине магнитной индукции B поля катушки: $F = kBI$, где k — коэффициент пропорциональности.

Так как при отсутствии насыщения магнитная индукция пропорциональна току, то угол поворота подвижной системы будет пропорционален квадрату тока. В этом случае шкала прибора должна быть квадратичной. Однако наличие в приборе ферромагнитного сердечника усложняет приводимую зависимость, вследствие чего шкала электромагнитных измеритель-

ных приборов неравномерна.

Придавая сердечнику специальную форму и изменяя его положение относительно катушки, можно добиться некоторого уменьшения неравномерности шкалы в большей ее части, кроме начальных делений, которые остаются очень сильно сжатыми.

В электромагнитных вольтметрах катушки выполняют из большого числа витков (2000—10 000) провода \varnothing 0,08—0,1 мм. Катушки амперметров содержат небольшое число витков толстого медного провода круглого или ленточного сечения. Внешние магнитные поля оказывают значительное влияние на работу электромагнитного прибора, но благодаря ферромагнитному кожуху это влияние значительно ослабляется.

В приборе с круглой катушкой (рис. 78) внутри ее помещены два сердечника: подвижный 1, жестко укрепленный на оси прибора вместе со стрелкой, и неподвижный 2.

Когда по катушке 4 протекает ток, возбуждающий магнитное поле, концы сердечников намагничиваются с одинаковой полярностью и отталкивание их одноименных полюсов создает вращающий момент. Подвижный сердечник 1, отталкиваясь от неподвижного 2, поворачивает ось со стрелкой на некоторый угол. Для ослабления влияния внешних магнитных полей на катушку надет ферромагнитный экран 3. Прибор снабжен магнитным успокоителем 5.

В электромагнитном приборе количество стали относительно мало, и большая часть пути магнитного потока проходит в воздухе. Поэтому измерительный механизм электромагнитной системы обладает малой чувствительностью, следовательно, затруднительно изготовить амперметр на малый ток (менее 0,5 А) или вольтметр на малое напряжение (менее 10 В).

Способность прибора работать в цепях переменного и постоянного тока объясняется тем, что изменение направления тока в катушке

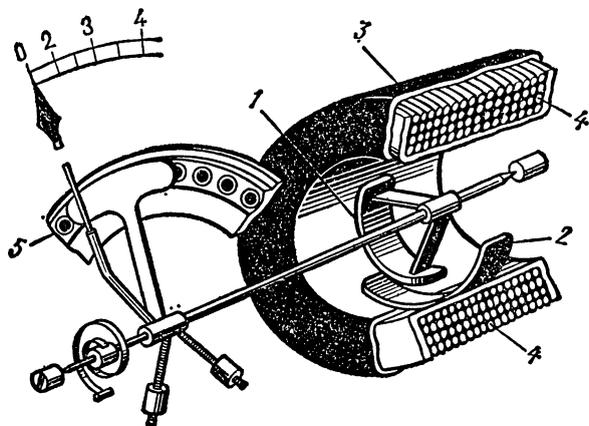


Рис. 78. Устройство электромагнитного прибора с круглой катушкой:

1 — подвижный сердечник, 2 — неподвижный сердечник, 3 — экран, 4 — катушка, 5 — магнитный успокоитель

приводит к перемагничиванию сердечников, вследствие чего направление вращающего момента не меняется. При переменном токе прибор показывает действующие значения тока или напряжения. Мощность, потребляемая электромагнитными приборами от сети, колеблется от 2 до 8 Вт.

К достоинствам электромагнитных приборов следует отнести их простоту, дешевизну, надежность в эксплуатации, способность выдерживать кратковременные перегрузки, а также пригодность для измерений в цепях переменного и постоянного тока.

Недостатками приборов электромагнитной системы являются их сравнительно малая точность (класс точности 1; 1,5; 2,5), неравномерность шкалы, довольно большая потребляемая мощность, зависимость показаний от частоты тока и влияния внешних магнитных полей.

§ 58. Приборы магнитоэлектрической системы

Приборы магнитоэлектрической системы применяют для измерения тока и напряжения в цепях постоянного тока. Действие приборов магнитоэлектрической системы основано на взаимодействии магнитного поля и проводника с током.

Неподвижная часть прибора (рис. 79) состоит из постоянного магнита 3 и стального цилиндра 2. Между полюсами магнита и стальным цилиндром имеется кольцевой воздушный зазор, в котором создается сильное и практически однородное магнитное поле.

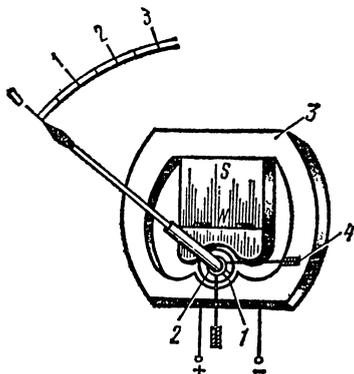


Рис. 79. Устройство прибора магнитоэлектрической системы: 1 — алюминиевая рамка, 2 — цилиндр, 3 — постоянный магнит, 4 — противовес

Подвижная часть прибора представляет собой катушку, выполненную тонким проводом на легкой алюминиевой рамке 1, свободно вращающейся (на двух полуосях) в кольцевом воздушном зазоре. К передней полуоси крепится стрелка с противовесами 4, предназначенными для уравнивания подвижной системы прибора. Противодействующий момент создается с помощью двух спиральных пружин, через которые на рамку подводится электрический ток.

При включении прибора по катушке проходит ток и возникает механическая сила, которая в соответствии с правилом

левой руки поворачивает рамку на некоторый угол. Величина этой силы зависит от магнитной индукции B , силы тока в катушке I , числа витков ω и активной длины проводника l : $F=2BIl\omega$. Так как магнитная индукция, активная длина и число витков (в каждом конкретном типе прибора) постоянны, угол поворота рамки будет определяться только силой тока, проходящего по катушке прибора, и противодействующим моментом возвратных пружин. Вследствие этого приборы магнитоэлектрической системы имеют равномерную шкалу.

При повороте рамки в магнитном поле в ее витках индуцируется эдс, направление которой определяется правилом Ленца. Возникший под действием эдс ток вызывает появление противодействующей силы, способствующей быстрому успокоению подвижной системы прибора. Это устраняет необходимость применения успокоителя.

Приборы магнитоэлектрической системы полярны (т. е. имеют положительный и отрицательный зажимы), а в цепи переменного тока не дают показаний. При прохождении по катушке переменного тока вращающий момент с частотой тока меняет свое направление. Из-за инерции подвижная система не будет успевать колебаться с частотой тока, поэтому останется неподвижной.

В результате высокой точности, чувствительности, равномерной шкалы, малого потребления энергии (10^{-4} — 10^{-6} Вт), быстрого успокоения подвижной системы и малой чувствительности к внешним маг-

нитным полям магнитоэлектрические приборы широко применяются в качестве вольтметров, миллиамперметров, микроамперметров, а также в универсальных измерительных приборах (авометрах).

К недостаткам приборов этой системы относятся: сравнительно высокая стоимость, чувствительность к перегрузкам и пригодность для измерений только в цепях постоянного тока. Последний недостаток может быть устранен путем включения прибора через полупроводниковый вентиль, но в этом случае прибор будет относиться уже к выпрямительной системе.

§ 59. Приборы электродинамической системы

Приборы электродинамической системы применяют для измерения напряжения, тока или мощности в цепях переменного и постоянного тока.

Действие электродинамических приборов основано на взаимодействии проводников с токами.

Прибор имеет неподвижную катушку 1 (рис. 80), которая содержит небольшое число витков толстой проволоки, и подвижную катушку 2 с большим числом витков тонкой проволоки, размещенную внутри неподвижной. На оси подвижной катушки укреплены стрелка 5 и пружины 4, предназначенные для подведения тока и создания противодействующего момента. Нижний конец стрелки оканчивается поршнем 3 воздушного успокоителя. В связи с чувствительностью прибора к внешним магнитным полям применение магнитного успокоителя в данной системе недопустимо.

При включении прибора в цепь по катушкам проходит ток и возникающие магнитные поля вызывают появление электродинамической силы, которая стремится повернуть подвижную систему так, чтобы магнитные поля обеих катушек совпали по направлению. Если допустить, что по катушкам прибора проходят одинаковые токи, то сила взаимодействия катушек (и вращающий момент)

будет пропорциональна квадрату силы тока: $F = kI^2$. Поэтому электродинамические амперметры имеют неравномерную шкалу.

При включении прибора в сеть переменного тока направление вращающего момента не изменится, так как направление тока изменяется одновременно в обеих катушках. В цепях переменного тока

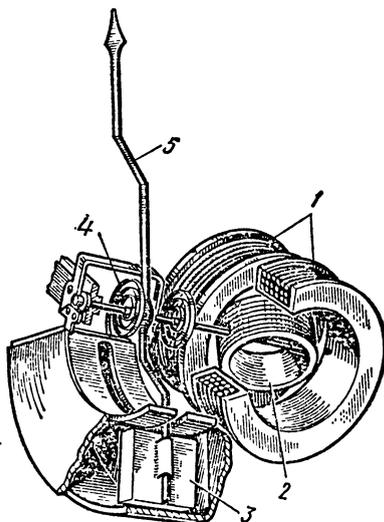


Рис. 80. Устройство прибора электродинамической системы:

1 — неподвижная катушка, 2 — подвижная катушка, 3 — поршень, 4 — пружина, 5 — стрелка

приборы данной системы показывают действующие значения измеряемой величины.

В случае использования прибора для измерения напряжения подвижную и неподвижную катушки соединяют последовательно. Такое же соединение применяют при измерении небольших токов (до 0,5 А). При измерении токов большей величины катушки прибора соединяют параллельно. Когда измеряют мощность, неподвижную катушку включают последовательно, а подвижную — параллельно. В последнем случае через неподвижную катушку будет проходить ток нагрузки, а через подвижную — ток, пропорциональный напряжению на нагрузке, что вызовет возникновение вращающего момента, пропорционального мощности, потребляемой нагрузкой ($P=UI$).

По этой причине электродинамические ваттметры имеют равномерную шкалу.

Достоинства электродинамических приборов — пригодность для измерения в цепях переменного и постоянного тока, возможность использования для измерения напряжения, силы тока или мощности, высокая точность, равномерность шкалы (у ваттметров).

Недостатки — сравнительно большое потребление мощности (при измерении токов и напряжений), чувствительность к внешним магнитным полям и перегрузкам, высокая стоимость.

Электродинамические приборы со стальным сердечником называются ферродинамическими. Однако с применением стали уменьшается точность прибора вследствие влияния гистерезиса и вихревых токов. Поэтому приборы ферродинамической системы для точных измерений не пригодны. Они используются в основном в качестве регистрирующих приборов и щитовых ваттметров.

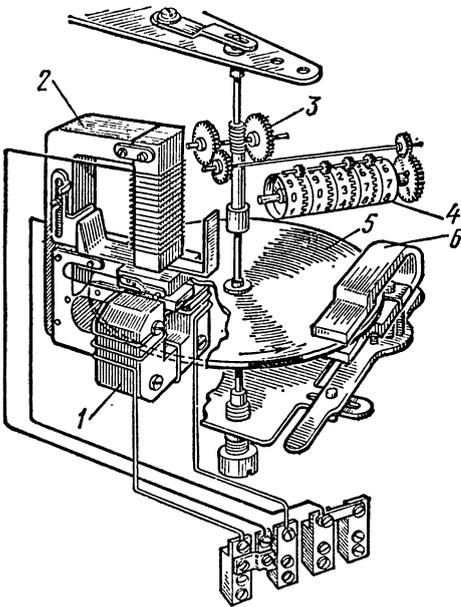


Рис. 81. Счетчик электрической энергии:
1 и 2 — электромагниты, 3 — редуктор, 4 —
счетный механизм, 5 — диск, 6 — тормозной
магнит

§ 60. Приборы индукционной системы

Индукционные приборы в настоящее время служат для измерения расхода электрической энергии в цепях переменного тока.

Действие индукционного счетчика основано на взаимодействии вихревых токов с вращающимся магнитным полем.

Основными деталями индукционного счетчика являются два

электромагнита 1 и 2, подвижный алюминиевый диск 5, редуктор 3, счетный механизм 4 и тормозной магнит 6 (рис. 81).

Магнитная система электромагнитов 1 и 2 имеет воздушные зазоры, причем катушка электромагнита 1 включается с нагрузкой последовательно, а катушка электромагнита 2 — параллельно. При определенном расположении электромагнитов между их полюсами создается вращающееся магнитное поле, в котором размещен свободно вращающийся алюминиевый диск. Вращающееся магнитное поле, пронизывая алюминиевый диск, индуцирует в нем вихревые токи. В результате взаимодействия вихревых токов с вращающимся магнитным полем возникает механическая сила, которая приводит диск 5 во вращение.

Сила взаимодействия между вихревыми токами и вращающимся магнитным полем пропорциональна произведению мгновенных значений тока и напряжения, т. е. мощности токоприемников: $M_{вр} = kP$, где k — постоянный коэффициент.

Чтобы скорость вращения диска была пропорциональна мощности токоприемников, применен тормозной магнит 6.

В диске при вращении его между полюсами тормозного магнита индуцируются вихревые токи, которые, взаимодействуя с магнитным полем магнита, создают противодействующий момент, пропорциональный частоте вращения диска. Чем быстрее вращается диск, тем больше сила его торможения.

Частота вращения диска становится постоянной, когда вращающийся момент уравнивается тормозящим моментом. Счетный механизм прибора измеряет число оборотов диска, т. е. величину, пропорциональную энергии, расходуемой на работу токоприемника.

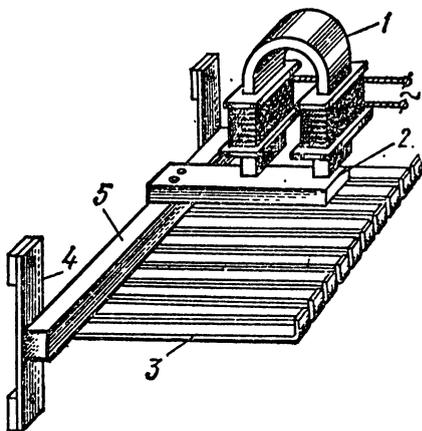


Рис. 82. Устройство частотомера вибрационной системы:

1 — электромагнит, 2 — ярлык, 3 — вибраторы, 4 — пластинчатые прижимы, 5 — брусок

§ 61. Приборы вибрационной системы

Приборы вибрационной системы предназначены для измерения частоты переменного тока.

Действие вибрационных приборов основано на использовании явлений электромагнетизма и механического резонанса.

Каждая механическая система, способная совершать колебательные движения, обладает определенной частотой собственных колебаний, которая обуславливается массой и упругостью системы. При резонансе, т. е. при совпадении частот собственных колебаний системы и колебаний внешнего источника, амплитуда колебаний данной меха-

нической системы резко увеличивается. Это свойство используется в измерительных приборах вибрационной системы.

Вибрационный частотомер (рис. 82) состоит из электромагнита 1, стального якоря 2, укрепленного на бруске 5, и нескольких вибраторов 3 с различной длиной или массой. Концы вибраторов отогнуты под прямым углом, окрашены белой краской и размещены в горизонтальной щели на шкале частотомера. Брусок 5 крепится к пластинчатым прижимам 4, что обеспечивает некоторую подвижность механической системы.

Если по обмотке электромагнита пропустить переменный ток, то якорь 2 будет сильнее притягиваться к полюсам в те моменты, когда ток имеет наибольшее значение, т. е. два раза за период. Колебания якоря передаются вибраторам. С наибольшей амплитудой будет колебаться вибратор, собственная частота колебаний которого совпадает с частотой колебаний якоря. Цифра на шкале, стоящая против вибратора, колеблющегося с наибольшей амплитудой, укажет частоту тока в сети.

Большинство частотомеров вибрационной системы предназначены для измерения частот 45—55 Гц. Однако встречаются частотомеры, рассчитанные для измерения более высоких частот (до 1550—1650 Гц).

Достоинство приборов вибрационной системы — независимость показаний от напряжения сети. Недостатки — зависимость показаний от механических вибраций, невозможность измерения высоких частот и прерывность шкалы, вследствие чего затрудняются измерения на промежуточных частотах, когда одновременно колеблется несколько вибраторов.

§ 62. Измерение силы тока и напряжения

Для измерения силы тока и напряжения используют измерительные приборы различных систем — амперметры и вольтметры, условное обозначение и схемы включения которых были показаны на рис. 12.

Для измерения малых значений тока применяют гальванометры, микроамперметры, миллиамперметры, а для измерения очень низких напряжений — милливольтметры, микровольтметры.

Включение амперметра последовательно с нагрузкой не должно влиять на измеряемый ток в цепи, поэтому сопротивление его должно быть малым по сравнению с сопротивлением приемника энергии. При малом сопротивлении амперметра R_a мала мощность, потребляемая им: $P_a = I_a^2 R_a$.

Включение вольтметра не должно влиять на измеряемое напряжение, поэтому сопротивление вольтметра должно быть большим по сравнению с сопротивлением приемника, параллельно которому он включен. При большом сопротивлении вольтметра R_v мал ток I_v в нем и мала мощность $P_v = I_v^2 R_v$, потребляемая им.

Для измерения токов и напряжений, превышающих верхний предел измерения прибора, применяют при постоянном токе шунты и добавочные сопротивления, а при переменном токе — измерительные трансформаторы тока и напряжения (см. § 75).

Если амперметром, рассчитанным на измерение сравнительно

небольшой силы тока, требуется измерить значительно бóльшую величину, то параллельно амперметру подключают шунт $R_{ш}$. В действительности шунт включают последовательно с нагрузкой, а амперметр подключают к шунту.

Шунт представляет собой толстую константовую или манганиновую пластину. Применение в качестве шунтов (и добавочных резисторов) манганина и константана объясняется тем, что сопротивление этих металлов в незначительной степени зависит от температуры.

Если сопротивление шунта в 9 раз меньше сопротивления обмотки амперметра, то 0,9 тока пройдет через шунт и только 0,1 — через прибор. При этом пределы измерений прибора расширяются в 10 раз.

Сопротивление шунта определяют по формуле $R_{ш} = R_a / (n - 1)$, где $R_{ш}$ — сопротивление шунта; R_a — сопротивление обмотки амперметра; n — число, показывающее, во сколько раз расширяются пределы измерения прибора.

После подключения шунта на шкале прибора следует поставить множитель (в данном случае $\times 10$). При включении амперметра с шунтом фактический ток в цепи определяется произведением показаний прибора на множитель.

Шунт должен иметь четыре контакта: к двум из них подключают прибор, а к двум другим — соединительные провода электрической цепи. Такое подсоединение исключает зависимость показаний прибора от переходных сопротивлений контактов.

Выбор сопротивления шунта зависит от внутреннего сопротивления прибора. Так, например, при расширении пределов измерений щитовых приборов, рассчитанных на десятки и сотни ампер, сопротивление шунтов может составлять тысячные или даже миллионные доли ома.

В тех случаях, когда вольтметром, рассчитанным на измерение небольших напряжений, требуется измерить большую величину, последовательно с вольтметром включают добавочный резистор R_d .

Если добавочное сопротивление R_d будет в 9 раз больше сопротивления обмотки вольтметра, то 0,9 общего напряжения будет приходиться на добавочное сопротивление R_d и только 0,1 — на сопротивление обмотки вольтметра R_v . При этом пределы измерений прибора расширятся в 10 раз.

Расчет сопротивления добавочного резистора производят по формуле $R_d = R_v (n - 1)$, где n — число, показывающее, во сколько раз расширяются пределы измерений прибора.

Очевидно, что после включения добавочного резистора необходимо изготовить новую шкалу или на имеющейся шкале поставить соответствующий множитель. Так как сопротивление добавочных резисторов в щитовых приборах может достигать нескольких тысяч ом, их выполняют в виде катушек из тонкого провода с большим удельным сопротивлением.

Шунты и добавочные резисторы можно монтировать как внутри прибора, так и подключать к его зажимам на время измерений. В последнем случае на шкале прибора указывают: «С отдельным шунтом» или «С отдельным добавочным резистором».

§ 63. Измерение сопротивлений

Для измерения сопротивления может быть использован метод амперметра и вольтметра. Частное от деления показаний вольтметра, подключенного к испытуемому резистору, на показания амперметра, включенного последовательно с этим резистором, определяет его сопротивление $R_x = U/I$. Для большей точности при измерении малых сопротивлений приборы следует включать так, чтобы сопротивление

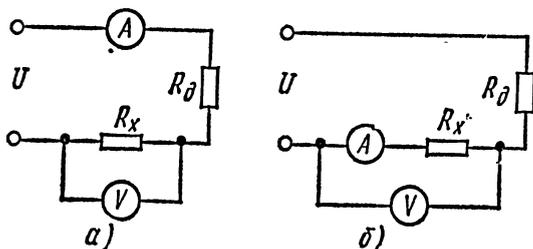


Рис. 83. Схема включения амперметра и вольтметра при измерении сопротивлений:
а — малой величины, б — большой величины

амперметра не вносило ошибки в показания вольтметра (рис. 83, а) при измерении больших сопротивлений — так, чтобы ток вольтметра не влиял на показания амперметра (рис. 83, б). Добавочное сопротивление R_d включено для ограничения тока.

Для непосредственного измерения сопротивления служат приборы, называемые омметрами и мегомметрами, которые могут включаться в схему последовательно или параллельно.

Для непосредственного измерения сопротивления

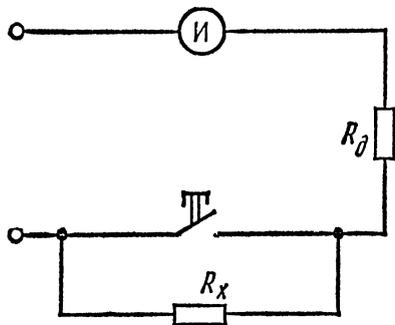


Рис. 84. Схема включения омметра

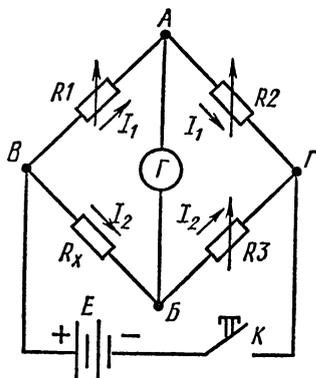


Рис. 85. Схема моста для измерения сопротивления

Омметр представляет собой магнитоэлектрический измерительный прибор с внутренним R_n и добавочным R_d сопротивлениями. Последовательно с омметром включается измеряемое сопротивление R_x (рис. 84). При отключенном сопротивлении R_x и разомкнутой

кнопке K тока в цепи нет и стрелка прибора показывает бесконечно большое сопротивление ($R_x = \infty$). При замкнутой кнопке K сопротивление цепи ($R_d + R_n$) минимально, т. е. ток в цепи максимален $I_{\text{макс}} = U/(R_d + R_n)$ и стрелка прибора отклоняется на наибольший угол, указывая нулевое сопротивление $R_x = 0$. При включении измеряемого сопротивления R_x ток в цепи уменьшается $I = U/(R_x + R_n + R_d)$ и стрелка прибора отклоняется на меньший угол, указывая значение сопротивления R_x на шкале прибора. Омметр имеет самостоятельный источник питания в виде сухих элементов. Недостатком такой схемы омметра является зависимость его показаний от напряжения источника питания.

Более точным методом измерения сопротивления и других электрических величин (индуктивностей, емкостей) является мостовая схема. Мост для измерения сопротивления (рис. 85) состоит из трех плеч с регулируемыми сопротивлениями R_1, R_2, R_3 (магазинов сопротивлений), которые вместе с четвертым измеряемым сопротивлением R_x образуют замкнутый контур $A-G-B-B$. К точкам B и G присоединяется источник питания, а к точкам A и B — гальванометр G . Регулировкой сопротивлений R_1, R_2, R_3 добиваются нулевого отклонения стрелки гальванометра. В этом случае потенциалы точек A и B одинаковы (мост уравновешен), т. е. $U_{BA} = U_{BB}$ и $U_{AG} = U_{BG}$ или $I_1 R_1 = I_2 R_x$ и $I_1 R_2 = I_2 R_3$. Разделив одно равенство на другое, получим: $I_1 R_1 / I_1 R_2 = I_2 R_x / I_2 R_3$, откуда $R_x = R_3 R_1 / R_2$.

При измерении малых сопротивлений большую погрешность вносят сопротивления контактов и соединительных проводов. В таких случаях используют более сложные схемы (двойные мосты).

При неизменных напряжении питания и сопротивлениях R_1, R_2, R_3 трех плеч моста показания гальванометра зависят от сопротивления R_x , что позволяет на шкале гальванометра нанести значения измеряемого сопротивления или значение того параметра, от которого оно зависит (температуры, давления, влажности и др.). Такие мосты называются неуравновешенными.

Исправная работа любой электротехнической установки в большой мере зависит от состояния изоляции как между проводами, так и между токопроводящими частями и землей. Эта изоляция относительно легко подвергается изменению и поэтому сопротивление изоляции необходимо периодически измерять.

Сопротивление изоляции сети, не находящейся под рабочим напряжением, измеряют мегомметром, один зажим которого (помеченный буквой Л) присоединяют к испытуемому проводу, а второй его зажим (помеченный буквой З) соединяют с землей. Вращая рукоятку индуктора мегомметра, представляющего маленький магнитоэлектрический генератор, отсчитывают на шкале прибора значение измеряемого сопротивления.

Для измерения сопротивления изоляции между двумя проводами к ним присоединяют зажимы Л и З мегомметра. Согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ) наименьшее допустимое сопротивление изоляции осветительных и силовых электропроводок составляет 0,5 МОм (мегом).

§ 64. Логометры

Логометрами (от греческого слова «логос» — отношение) называются приборы, угол поворота измерительных механизмов которых зависит от отношения токов.

В большинстве электроизмерительных приборов непосредственного отсчета отклонение подвижной части зависит от тока, проходящего через прибор. При измерении некоторой электрической или неэлектрической величины X , не зависящей от тока (сопротивления, сдвига фаз, температуры, давления и т. д.), необходимо, чтобы проходящий через прибор ток зависел от величины, подлежащей измерению. Однако ток пропорционален напряжению и показания прибора для измерения некоторой величины X становятся зависимыми от двух переменных — измеряемой величины и напряжения U источника питания. При отсутствии прямой зависимости между X и U зависимость показаний прибора от напряжения исключает возможность градуировать шкалу прибора в единицах X (например, в омах), так как изменение напряжения приведет к погрешностям при измерении.

Для устранения влияния изменений напряжения на показания прибора в логометрах положение равновесия подвижной части определяется отношением токов в двух обмотках прибора и от напряжения не зависит.

Электроизмерительный прибор любой системы является логометром, если в нем не только вращающий, но и противодействующий

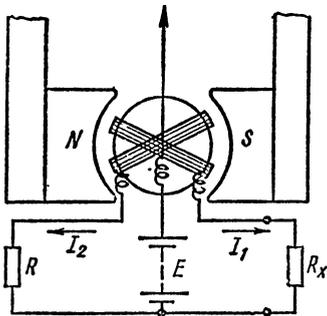


Рис. 86. Схема магнитоэлектрического логометра для измерения сопротивления

моменты создаются электрическим путем, т. е. для логометров характерно отсутствие механического противодействующего момента (пружин). Упрощенная схема магнитоэлектрического логометра для измерения сопротивления изображена на рис. 86. Подвижная часть прибора состоит из двух рамок, установленных на общей оси и жестко скрепленных между собой под некоторым углом. Ток в подвижные катушки подводится через три мягкие серебряные спирали, не создающие механического момента. Если подвижная система хорошо уравновешена, то при отсутствии токов она будет находиться в состоянии

безразличного равновесия. Подвижные катушки присоединяются к общему источнику тока, а их цепи замыкаются через сопротивления: R — смонтированное внутри прибора и R_x — измеряемое сопротивление вне прибора. Токи, проходящие по катушкам прибора, взаимодействуя с магнитным полем полюсов, создают два момента, воздействующих на подвижную часть: $M_{вр}$ — вращающий и $M_{пр}$ — противодействующий. Эти моменты противоположны по направлению, причем поворот подвижной части по направлению одного из моментов вызывает уменьшение этого момента, так как создающая этот момент

катушка входит в более разреженную часть магнитного поля и одновременно увеличивается момент противоположного направления.

Таким образом, автоматически устанавливается равновесие моментов ($M_{вр} = M_{пр}$) и любому отношению токов в катушке прибора соответствует некоторое положение равновесия при определенном отклонении стрелки прибора. Следовательно, угол отклонения стрелки прибора зависит от отношения токов в катушках I_1/I_2 .

Так как токи в параллельных ветвях обратно пропорциональны сопротивлениям, т. е. $I_1/I_2 = R/R_x$, а сопротивление R известно, то угол поворота стрелки прибора зависит только от измеряемого сопротивления R_x и на него не влияет напряжение источника. Поэтому шкала прибора может быть градуирована в единицах сопротивления (омах) и тогда логометр станет омметром. Если измеряемое сопротивление R_x изготовлено из проводящего материала с большим температурным коэффициентом, то этот же прибор можно использовать в качестве электрического термометра; если же в качестве R_x взять столбик из угольных пластин, сопротивление которого в сильной степени зависит от силы сжатия их, то прибор может быть использован для измерения давления и других величин.

§ 65. Измерение мощности и энергии

Для измерения мощности в цепи постоянного тока не требуется специального прибора, так как мощность $P = UI$ легко может быть подсчитана по показаниям вольтметра и амперметра.

В цепи переменного тока мощность зависит не только от напряжения и тока, но и от сдвига фаз между ними: $P = UI \cos \varphi$. Поэтому произведение напряжения и тока не определяет мощности, для измерения которой необходим ваттметр электродинамической или ферродинамической системы. В электродинамическом ваттметре неподвижная катушка включается последовательно с нагрузкой R_H , а подвижная снабжается добавочным сопротивлением R_d и включается параллельно нагрузке (рис. 87). Таким образом, мгновенное значение тока неподвижной катушки равно току нагрузки, а ток подвижной катушки пропорционален напряжению на зажимах приемника и должен совпадать с напряжением по фазе. Чтобы ток совпадал по фазе с напряжением, добавочное активное сопротивление R_d должно быть много больше индуктивного сопротивления самой обмотки, что дает возможность считать сопротивление цепи напряжения безреактивным.

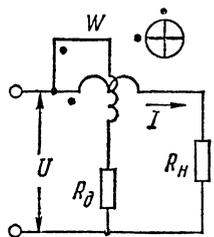


Рис. 87. Схема включения ваттметра

Вращающий момент у электродинамического ваттметра пропорционален произведению напряжения и тока. При включении ваттметра в цепь переменного тока на вращающий момент не влияет одновременное изменение направления тока в обеих катушках, но если поменять местами зажимы одной из двух катушек ваттметра, то это изменит фазу тока в этой катушке на 180° и направление вращающего

момента. Для предупреждения возможности неправильного включения ваттметра относительные «начала» двух катушек ваттметра (генераторные зажимы), присоединенные к одному и тому же полюсу источника, отмечаются у зажимов прибора знаком звездочка (*); концы этих катушек присоединены к разным полюсам нагрузки. Электродинамические ваттметры используются как в цепях переменного, так и постоянного тока. Ферродинамические ваттметры обладают меньшей точностью и в цепях постоянного тока непригодны из-за влияния гистерезиса.

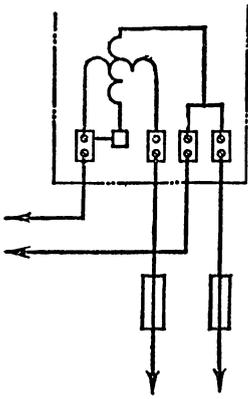


Рис. 88. Схема включения счетчика

Для измерения расхода электрической энергии переменного тока применяют счетчики индукционной системы. Схема включения счетчика в сеть (рис. 88) подобна схеме включения ваттметра, т. е. одна обмотка счетчика включается последовательно с нагрузкой, а вторая — параллельно ей. В отличие от ваттметров в цепи параллельной обмотки никаких добавочных сопротивлений нет, так как для создания вращающего магнитного поля тока в двух катушках должны быть сдвинуты по фазе на угол, близкий к 90° .

На таблице счетчика указано напряжение, ток, частота, на которые он рассчитан, в каких единицах измеряют энергию, какому количеству оборотов диска соответствует расход энергии в 1 кВт·ч.

§ 66. Измерение неэлектрических величин

Широко применяется измерение неэлектрических величин электрическими методами, так как с помощью его получают измерение дистанционное, непрерывное, высокой точности и чувствительности.

Для измерения неэлектрическую величину преобразуют в зависящую от нее электрическую величину, определяемую показаниями электроизмерительного прибора. Элемент, преобразующий неэлектрическую измеряемую величину в зависящую от нее электрическую величину, называется первичным измерительным преобразователем или датчиком. Датчики делятся на две группы: параметрические, преобразующие неэлектрическую величину в один из параметров электрической цепи R , L , C , и генераторные, в которых неэлектрическая величина преобразуется в эдс.

Выше было отмечено (см. § 64), что при измерении сопротивления, зависящего от температуры — терморезистора, логометр становится термометром и шкала его может быть проградуирована в градусах. При сопротивлении, зависящем от силы сжатия или давления — тензосопротивления, прибор измеряет эти величины. Если в качестве измеряемого сопротивления в схему вводится реостат (реостатный преобразователь), движок которого перемещается под воздействием неэлектрической величины, изменяя сопротивление реостата, то в этом

случае логометр может быть использован для определения уровня жидкости, линейного или углового перемещения детали и т. д.

Индуктивные и емкостные преобразователи (датчики) служат для измерения силы, давления, линейного или углового перемещения детали. В этих преобразователях индуктивность или емкость изменяются в зависимости от положения одной из частей преобразователя под действием измеряемой величины.

В преобразователях индукционного типа измеряемая неэлектрическая величина, например скорость, линейные или угловые перемещения преобразуются в эдс. Такие преобразователи относятся к группе генераторных.

На рис. 89 изображена принципиальная схема индукционного тахометра, являющегося прибором для измерения частоты вращения и преобразующего измеряемую величину в пропорциональную ей эдс. Тахометр представляет собой маленький генератор, якорь которого вращается в магнитном поле постоянного магнита и эдс которого пропорциональна частоте вращения якоря. Якорь механически связан с валом машины, скорость которой измеряется, поэтому показания вольтметра V , соединенного с зажимами якоря, пропорциональны измеряемой частоте вращения.

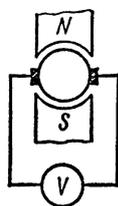


Рис. 89. Схема индукционного тахометра

Кроме индукционных к преобразователям генераторного типа относятся термоэлектрические, пьезоэлектрические и др. В пьезоэлектрических преобразователях используется возникновение эдс в некоторых кристаллах под действием механических сил (пьезоэлектрический эффект) для измерения этих сил или давления.

Устройства для измерения неэлектрических величин принципиально должны содержать преобразователь, соединительные провода и электронизмерительный прибор, шкала которого проградуирована в значениях измеряемой величины. В действительности эти устройства значительно сложнее, так как они содержат еще источники питания, стабилизаторы, выпрямители, усилители и т. д.

§ 67. Цифровые приборы

В цифровом приборе, служащем для измерения, непрерывно изменяющаяся измеряемая величина преобразуется в дискретную (прерывную) величину в виде числа, которое изображается на его отсчетном устройстве.

В цифровых приборах измерение производится сравнением измеряемой величины со значениями образцовой (эталонной), т. е. нулевым методом. При включении на входные зажимы прибора измеряемой величины она автоматически преобразуется в цифры специальной электронной схемой. После этого блок цифровой индикации включает цифровые лампы так, чтобы они соответствовали числовым значениям измеряемой величины. В цифровой лампе размещается десять катодов,

соответствующих цифрам десятичного ряда 0—9, и они высвечивают любую цифру этого ряда при подаче на них соответствующего сигнала.

Цифровые приборы предназначены для измерения различных электрических величин: тока, напряжения и др. Так, например, пятизначный цифровой прибор В7-18 может быть использован для измерения тока, напряжения, сопротивления и частоты. Время одного измерения не превышает нескольких миллисекунд с погрешностью до $0,01 \div 0,1\%$.

Цифровые приборы в сочетании с вычислительными машинами используются для автоматического контроля управления производственными процессами.

Недостатками цифровых приборов являются сложность их устройства и высокая стоимость.

Контрольные вопросы

1. Перечислите системы и классы точности приборов.
2. Какова роль корректора, успокоителя и зеркальной шкалы в приборах?
3. Поясните устройство и принцип действия прибора электромагнитной системы.
4. Расскажите об устройстве и принципе действия магнитоэлектрического прибора.
5. Как устроен и каков принцип действия электродинамического прибора?
6. Из каких основных частей состоит прибор индукционной системы?
7. Поясните принцип действия индукционного счетчика.
8. Расскажите об устройстве и принципе действия вибрационного прибора.
9. Каково назначение шунтов и добавочных резисторов?
10. Поясните принцип работы логометра.
11. Как измеряются мощность и энергия?

Глава VII

ТРАНСФОРМАТОРЫ

§ 68. Общие сведения о трансформаторах

Т р а н с ф о р м а т о р о м называется статический электромагнитный аппарат, преобразующий переменный ток одного напряжения в переменный ток той же частоты, но другого напряжения.

Трансформаторы получили очень широкое практическое применение при передаче электрической энергии на большие расстояния, для распределения энергии между ее приемниками и в различных выпрямительных, сигнальных, усилительных и других устройствах.

При передаче электрической энергии от электростанций к ее потребителям большое значение имеет величина тока, проходящего по проводам. В зависимости от силы тока выбирают сечение проводов линии передачи энергии и, следовательно, определяют стоимость проводов, а также и потери энергии в них.

Если при одной и той же передаваемой мощности увеличить напряжение, то ток в той же мере уменьшится, а это позволит применять провода с меньшим поперечным сечением для устройства линии передачи электрической энергии и уменьшит расход цветных металлов, а также потери мощности в линии.

При неизменной передаваемой мощности поперечное сечение провода и потери мощности в линии обратно пропорциональны напряжению.

Электрическая энергия вырабатывается на электростанциях синхронными генераторами при напряжении 11—18 кВ (в некоторых случаях при 30—35 кВ). Хотя это напряжение очень велико для непосредственного его использования потребителями, однако оно недостаточно для экономичной передачи электроэнергии на большие расстояния. Для увеличения напряжения применяют п о в ы ш а ю щ и е т р а н с ф о р м а т о р ы.

Приемники электрической энергии (лампы накаливания, электродвигатели и т. д.) из соображений безопасности для лиц, пользующихся этими приемниками, рассчитываются на более низкое напряжение (110—380 В). Кроме того, высокое напряжение требует усиленной изоляции токопроводящих частей, что делает конструкцию аппаратов и приборов очень сложной. Поэтому высокое напряжение, при котором передается энергия, не может непосредственно использоваться для питания приемников, вследствие чего к потребителям энергия подводится через п о н и ж а ю щ и е т р а с ф о р м а т о р ы.

Таким образом, электрическая энергия при передаче от места ее производства к месту потребления трансформируется несколько раз (3—4 раза). Кроме того, понижающие трансформаторы в распределении

тельных сетях включаются одновременно и не всегда на полную мощность; вследствие чего мощности установленных трансформаторов значительно больше (в 7—8 раз) мощностей генераторов, вырабатывающих электроэнергию на электростанциях.

Трансформатор имеет две изолированные обмотки, помещенные на стальном магнитопроводе. Обмотка, включенная в сеть источника электрической энергии, называется первичной; обмотка, от которой энергия подается к приемнику, — вторичной.

Обычно напряжения первичной и вторичной обмоток неодинаковы. Если вторичное напряжение больше первичного, то трансформатор называется повышающим, если же вторичное напряжение меньше первичного, то понижающим. Любой трансформатор может быть использован и как повышающий, и как понижающий.

§ 69. Принцип действия и устройство трансформатора

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. Если первичную обмотку трансформатора включить в сеть источника переменного тока, то по ней будет проходить переменный ток, который возбудит в сердечнике трансформатора переменный магнитный поток. Магнитный поток, пронизывая витки вторичной обмотки трансформатора, индуцирует в этой обмотке эдс. Под действием этой эдс по вторичной обмотке и через приемник энергии будет протекать ток. Таким образом, электрическая энергия, трансформируясь, передается из первичной цепи во вторичную, но при другом напряжении, на которое рассчитан приемник энергии, включенный во вторичную цепь.

Для улучшения магнитной связи между первичной и вторичной обмотками их помещают на стальном магнитопроводе.

Для уменьшения потерь от вихревых токов магнитопроводы трансформаторов собирают из тонких пластин (толщиной 0,5 и 0,35 мм) трансформаторной стали, покрытых изоляцией (жаростойким лаком).

Материалом магнитопровода является трансформаторная сталь Э-42, Э-43, Э-43А, Э-320, Э-330, Э-330А и др.

Холоднокатаная сталь имеет высокую магнитную проницаемость (больше чем горячекатаная) в направлении, совпадающем с направлением проката, тогда как перпендикулярно прокату магнитная проницаемость относительно низкая. Поэтому магнитопроводы из холоднокатаной стали делают так, чтобы магнитные линии замыкались по направлению проката стали. Магнитопроводы трансформаторов малой мощности изготовляют из ленты холоднокатаной стали.

В трансформаторах больших мощностей магнитопроводы собирают из полос стали. Холоднокатаную сталь разрезают так, чтобы направление магнитных линий в собранном магнитопроводе совпадало с направлением прокатки стали. У горячекатаной стали (Э-42, Э-43 и др.) магнитная проницаемость одинакова во всех направлениях и при малых мощностях магнитопроводы собирают из пластин Ш или П-образной формы, которые штампуются из листовой стали.

В зависимости от формы магнитопровода и расположения обмоток на нем трансформаторы могут быть стержневыми и броневыми. Магнитопровод стержневого однофазного трансформатора имеет два стержня, на которых помещены его обмотки (рис. 90, *а*). Эти стержни соединены ярмом с двух сторон так, что магнитный поток замыкается по стали. Магнитопровод броневое однофазного трансформатора (рис. 90, *б*) имеет один стержень, на котором полностью помещены

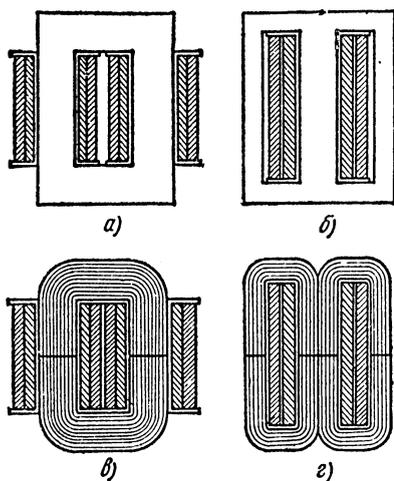


Рис. 90. Магнитопроводы однофазных трансформаторов:
а — пластинчатый стержневой, *б* — пластинчатый броневой, *в* — ленточный стержневой, *г* — ленточный броневой

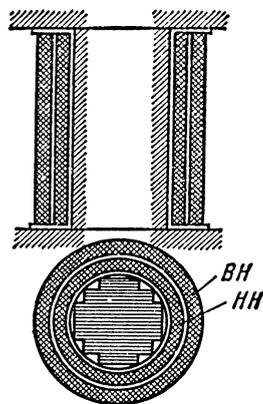


Рис. 91. Расположение обмоток мощного трансформатора на магнитопроводе

обмотки трансформатора. Стержень с двух сторон охватывается (бронирован) ярмом так, что обмотка частично защищена магнитопроводом от механических повреждений.

Ленточные магнитопроводы из холоднокатаной стали подобны стержневым (рис. 90, *в*) или броневым (рис. 90, *г*).

Трансформаторы большой мощности в настоящее время изготовляют исключительно стержневыми, а трансформаторы малой мощности часто делают броневыми.

Расположение обмоток на магнитопроводе показано на рис. 91. Ближе к стержню магнитопровода располагается обмотка низшего напряжения НН, так как ее легче изолировать от магнитопровода, чем обмотку высшего напряжения ВН. Обмотку высшего напряжения изолируют от обмотки низшего напряжения прокладками, рейками, шайбами и другими изоляционными деталями (чаще из электрокартона).

При цилиндрических обмотках поперечному сечению магнитопровода желательно придать круглую форму, так как в этом случае в площади, охватываемой обмотками, не остается промежутков, не за-

полненных сталью. Чем меньше незаполненных промежутков, тем меньше длина витков обмоток и, следовательно, масса обмоточного провода при заданной площади поперечного сечения магнитопровода. Однако магнитопроводы круглого поперечного сечения не делают. Для изготовления магнитопровода круглого сечения надо было бы собрать его из большого числа стальных листов различной ширины. Поэтому у трансформаторов большой мощности магнитопровод имеет ступенчатое поперечное сечение с числом ступеней не более 9—10. Число ступеней сечения сердечника определяется числом углов в одной четверти круга. На рис. 91 показано поперечное сечение трехступенчатого магнитопровода.

Для лучшего охлаждения в магнитопроводах и в обмотках мощных трансформаторов устраивают охлаждающие каналы в плоскостях, параллельных и перпендикулярных плоскости стальных листов.

В трансформаторах малой мощности поперечное сечение магнитопровода имеет прямоугольную форму и обмоткам придают форму прямоугольных катушек. При малых токах радиальные механические усилия, возникающие при работе трансформатора и действующие на обмотки, будут малы, так что изготовление обмоток упрощается.

В паспорте трансформатора указывают его номинальную мощность S , номинальные напряжения U_1 и U_2 и токи I_1 и I_2 первичной и вторичной обмоток при полной (номинальной) нагрузке.

Номинальной мощностью трансформаторов называется полная мощность, отдаваемая его вторичной обмоткой при полной (номинальной) нагрузке. Номинальная мощность выражается в единицах полной мощности, т. е. в вольт-амперах или киловольт-амперах. В ваттах и киловаттах измеряют активную мощность трансформатора, т. е. ту мощность, которая может быть преобразована из электрической в механическую, тепловую, химическую, световую и т. д.

Сечения проводов обмоток и всех частей машины или любого электрического аппарата определяются не активной составляющей тока или активной мощностью, а полным током, проходящим по проводнику, и, следовательно, полной мощностью.

Трансформаторы малой мощности имеют большую удельную поверхность охлаждения, и естественное воздушное охлаждение является для них вполне достаточным.

Трансформаторы большой мощности устраивают с масляным охлаждением, для чего помещают их в металлические баки, наполненные минеральным маслом. Наиболее широко распространено естественное охлаждение стенок бака трансформатора.

Для увеличения охлаждающей поверхности в стенки баков вваривают стальные трубы или радиаторы.

Масло в баке трансформатора в процессе эксплуатации соприкасается с окружающим воздухом и подвергается окислению, увлажнению и загрязнению, вследствие чего уменьшается его электрическая прочность.

Для обеспечения нормальной эксплуатации трансформатора необходимо контролировать температуру масла, заменять его новым, производить периодическую сушку и очистку.

§ 70. Работа трансформатора под нагрузкой

При холостом ходе трансформатора (нагрузки нет) вторичная обмотка его разомкнута и ток в этой обмотке не проходит. В первичной обмотке при этом проходит ток холостого хода I_0 , который много меньше тока этой обмотки при номинальной нагрузке трансформатора. Намагничивающая сила холостого хода $I_0\omega_1$ возбуждает переменный магнитный поток, который замыкается по магнитопроводу и индуцирует в первичной и вторичной обмотках эдс, зависящие от числа витков этих обмоток ω_1 и ω_2 , амплитуды магнитного потока Φ_m (Вб) и частоты его изменения f . Действующие значения эдс первичной E_1 и вторичной E_2 обмоток:

$$E_1 = 4,44\omega_1 f \Phi_m \quad \text{и} \quad E_2 = 4,44\omega_2 f \Phi_m.$$

Так как при холостом ходе во вторичной обмотке тока нет, то напряжение на зажимах этой обмотки равно эдс, т. е. $U_2 = E_2$. В первичной обмотке проходит небольшой ток холостого хода и напряжение этой обмотки незначительно отличается от эдс, т. е. $U_1 \approx E_1$. Отношение напряжений на зажимах первичной и вторичной обмоток трансформатора при холостом ходе (без нагрузки) называется коэффициентом трансформации и обозначается буквой n , т. е.

$$n = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} \quad \text{и} \quad U_1 = \frac{\omega_1}{\omega_2} U_2 = n U_2.$$

Таким образом, если в трансформаторе первичная и вторичная обмотки имеют различное число витков, то при включении первичной обмотки в сеть переменного тока с напряжением U_1 на зажимах вторичной обмотки возникает напряжение U_2 , не равное напряжению U_1 .

Если вторичную обмотку трансформатора замкнуть на какой-либо приемник энергии (рис. 92, а), то во вторичной цепи будет проходить ток I_2 , а в первичной обмотке — ток I_1 . Магнитодвижущие силы первичной и вторичной обмоток $I_1\omega_1$ и $I_2\omega_2$ совместно возбуждают в

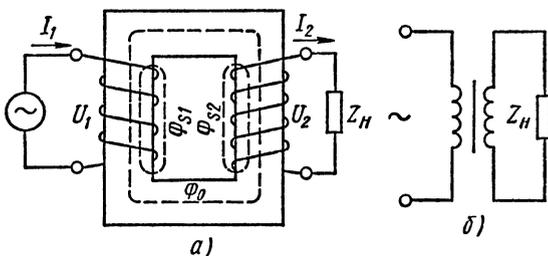


Рис. 92. Схема работы трансформатора (а) и его условное обозначение (б)

магнитопроводе результирующий магнитный поток. Пренебрегая падением напряжения в сопротивлении первичной обмотки трансформатора и потоком рассеяния, можно допустить при любой его нагрузке приближенное равенство абсолютных величин приложенного напряжения и уравновешивающей это напряжение эдс первичной обмотки, т. е. $U_1 = E_1$. Поэтому при неизменном по величине приложенном напряжении U_1 будет приблизительно неизменной эдс E_1 , индуцированная в первичной обмотке при любой нагрузке трансформатора. Так как эдс E_1 зависит от магнитного потока, то и маг-

нитный поток в магнитопроводе трансформатора при любом изменении нагрузки будет приблизительно неизменным и равным магнитному потоку при холостом ходе Φ_m . Следовательно, геометрическая сумма мдс первичной и вторичной обмоток трансформатора при нагрузке равна мдс холостого хода, т. е. $I_1\omega_1 + I_2\omega_2 = I_0\omega_1$, откуда $I_1\omega_1 = I_0\omega_1 - I_2\omega_2$ или $I_1 = I_0 - I_2 \frac{\omega_2}{\omega_1} = I_2 \frac{1}{n}$ — приведенный к первичной цепи ток вторичной обмотки.

Таким образом, при нагрузке трансформатора ток первичной обмотки возбуждает магнитный поток в магнитопроводе с неизменной амплитудой (составляющая I_0) и уравнивает размагничивающее действие тока вторичной обмотки (составляющая $-I_2$).

Ток I_2 , проходящий по вторичной обмотке при нагрузке трансформатора, создает свой магнитный поток, который согласно закону Ленца направлен встречно магнитному потоку в сердечнике и стремится его уменьшить; это бы вызвало уменьшение эдс E_1 и увеличение тока I_1 . Чтобы результирующий магнитный поток в сердечнике остался неизменным, встречный магнитный поток вторичной обмотки должен быть уравновешен магнитным потоком первичной обмотки.

Следовательно, при увеличении тока вторичной обмотки I_2 возрастает размагничивающий магнитный поток этой обмотки и одновременно увеличиваются как ток первичной обмотки I_1 ; так и магнитный поток, создаваемый этим током. Так как магнитный поток первичной обмотки уравнивает размагничивающий поток вторичной обмотки, то результирующий магнитный поток в сердечнике оказывается неизменным.

В понижающем трансформаторе напряжение первичной обмотки U_1 больше напряжения вторичной обмотки U_2 в n раз и ток вторичной обмотки I_2 больше тока первичной обмотки I_1 также в n раз. В повышающем трансформаторе имеет место обратное соотношение между напряжениями его обмоток и между токами в них.

Если, например, включить на полную нагрузку трансформатор, напряжения первичной и вторичной обмоток которого равны $U_1 = 220$ В, $U_2 = 24$ В, то при номинальном токе первичной обмотки $I_1 = 3$ А, ток во вторичной обмотке $I_2 = 3 \cdot \frac{220}{24} = 27,5$ А.

Таким образом, в обмотке с более высоким напряжением ток меньше, чем в обмотке с более низким напряжением. Обмотка с более высоким напряжением имеет большее число витков и наматывается из провода с меньшим поперечным сечением, чем обмотка с более низким напряжением.

При работе трансформатора под нагрузкой в первичной и во вторичной его обмотках проходят токи, создающие потоки рассеяния Φ_{S1} и Φ_{S2} . Эти магнитные потоки сцеплены только с витками той обмотки, током которой они создаются, и всегда много меньше основного магнитного потока Φ_m , замыкающегося по магнитопроводу трансформатора (по стали), так как потоки рассеяния частично проходят в немагнитной среде. Потоки рассеяния индуктируют в обмотках эдс рассеяния, которые в небольшой степени изменяют напряжение

вторичной обмотки трансформатора при изменении его нагрузки. Условное обозначение трансформатора показано на рис. 92, б.

Чтобы не устанавливать отдельный трансформатор на каждое рабочее напряжение, целесообразно на одном трансформаторе иметь несколько вторичных обмоток с различным числом витков. Такие трансформаторы, называемые многообмоточными, широко применяют в радиоприемниках, телевизорах, усилителях и другой аппаратуре, требующей для питания несколько переменных напряжений различной величины. Соотношения числа витков обмоток определяются их напряжениями, т. е. $\omega_2/\omega_1=U_2/U_1$; $\omega_3/\omega_1=U_3/U_1$.

Ток в первичной обмотке равен суммарному току всех приведенных вторичных обмоток: $I_1=I_2U_2/U_1+I_3U_3/U_1+\dots$

Изменение тока в любой вторичной обмотке вызывает соответствующее изменение тока первичной обмотки. При этом несколько изменяются напряжения всех вторичных обмоток трансформатора, т. е. напряжение любой вторичной обмотки зависит от тока как в этой обмотке, так и в любой другой вторичной обмотке трансформатора.

§ 71. Трехфазные трансформаторы

Трехфазные трансформаторы изготовляют главным образом стержневыми.

Схема построения магнитопровода трехфазного стержневого трансформатора показана на рис. 93, а. Три одинаковых однофазных транс-

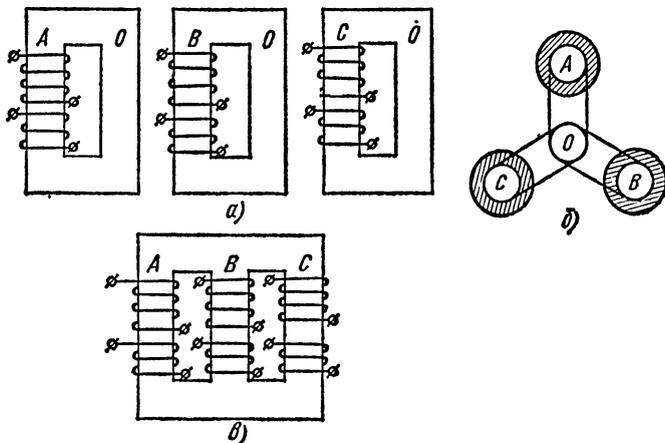


Рис. 93. Схема построения трехфазного трансформатора: а — три однофазных трансформатора, б — три однофазных трансформатора объединены в один магнитопровод, в — схема трехфазного стержневого трансформатора

форматора выполнены так, что их первичные и вторичные обмотки размещены на одном стержне сердечника, а другой стержень магнитопровода каждого трансформатора не имеет обмотки. Если эти три трансформатора расположились так, чтобы стержни, не имеющие

обмоток, находились рядом, то эти три стержня можно объединить в один O (рис. 93, б). Через объединенный стержень O будут замыкаться магнитные потоки трех однофазных трансформаторов, которые равны по величине и сдвинуты по фазе на $1/3$ периода. Так как сумма трех равных по амплитуде и сдвинутых по фазе на $1/3$ периода магнитных потоков равна нулю в любой момент времени ($\Phi_a + \Phi_b + \Phi_c = 0$), то в объединенном стержне магнитного потока нет и надобность в этом стержне отпадает. Таким образом, для образования магнитопровода достаточно иметь три стержня, которые по конструктивным соображениям располагаются в одной плоскости (рис. 93, в). На каждом стержне трехфазного трансформатора размещаются обмотки высшего и низшего напряжения одной фазы. Стержни соединяются между собой ярмом сверху и снизу.

Конструктивно обмотки трехфазных трансформаторов выполняются так же, как и однофазных.

Начала фаз обмоток высшего напряжения обозначаются прописными буквами A, B и C , а концы фаз — X, Y и Z . Если обмотка высшего напряжения имеет выведенную нулевую точку, то этот зажим обозначается буквой O .

Начала фаз обмоток низшего напряжения обозначаются строчными буквами a, b, c , а концы фаз — x, y, z ; o — вывод нулевой точки.

Обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены звездой и треугольником. При соединении обмоток звездой концы (или начала) трех фаз соединяются между собой, образуя нейтральную, или нулевую точку, а свободные зажимы начал (или концов) трех фаз подключаются к трем проводам сети источника (или приемника) электрической энергии переменного тока. При соединении обмоток треугольником начало первой фазы соединяется с концом второй, начало второй фазы — с концом третьей, начало третьей фазы — с концом первой. Точки соединения начала одной фазы с концом другой подключаются к проводам трехфазной сети переменного тока.

Соединение обмоток трехфазных трансформаторов звездой обозначается Y , а треугольником — Δ . Если обмотки соединены звездой и имеют выведенную нулевую точку, то такое соединение обозна-

чается Y

Группы трехфазных трансформаторов обозначаются знаками следующего вида: $Y/Y-0$, $Y/\Delta-11$ и т. д., где знак перед косой ли-

ней показывает схему соединения обмоток высшего напряжения, знак после косой линии — схему соединения обмоток низшего напряжения, цифра — угол между векторами линейных напряжений обмоток высшего и низшего напряжения, выраженный числом угловых единиц по 30° .

Так, первое обозначение группы показывает, что обмотки высшего и низшего напряжения соединены звездой, причем обмотки низшего напряжения имеют выведенную нулевую точку, и угол между векто-

рами линейных эдс обмоток высшего и низшего напряжения равен $0 \times 30^\circ$, т. е. 0° .

Группы трехфазных трансформаторов зависят от схем соединения обмоток, обозначения зажимов фаз обмоток высшего и низшего напряжения и направления намоток. Если направление намоток витков обмоток высшего и низшего напряжения одинаково, то эдс, индуцируемые в фазах обмоток высшего и низшего напряжения, совпадают по фазе; если же обмотки имеют встречное направление намотки, то эдс фаз высшего и низшего напряжения находятся в противофазе.

В СССР стандартными группами являются следующие:

$$Y/Y-0; Y/\Delta-11; Y/\Delta-11$$

В стандартных схемах обмотки высшего напряжения соединены звездой, так как при такой схеме фазное напряжение в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного, тем самым упрощается изоляция обмоток. Обмотки низшего напряжения чаще соединяются треугольником, так как при таком соединении трансформатор менее чувствителен к несимметрии нагрузки фаз.

Обмотки низшего напряжения соединяются также по схеме звезда с нулем, так как при такой схеме можно в четырехпроводной сети получить два различных напряжения — линейное и фазное (например, 127 и 220 В, 220 и 380 В и т. д.). Для увеличения мощности трансформаторной подстанции и для упрощения резерва используется параллельное включение трансформаторов, одним из необходимых условий которого является принадлежность их к одинаковым группам.

§ 72. Опыты холостого хода и короткого замыкания

Для испытания трансформатора служат опыты холостого хода и короткого замыкания.

При опыте холостого хода трансформатора (рис. 94, а) его вторичная обмотка разомкнута и тока в этой обмотке нет ($I_2=0$). Если первичную обмотку трансформатора включить в сеть источника электрической энергии переменного тока, то в этой обмотке будет проходить ток холостого хода I_0 . В трансформаторах больших мощностей ток холостого хода может достигать значений порядка 5—10% номинального тока. В

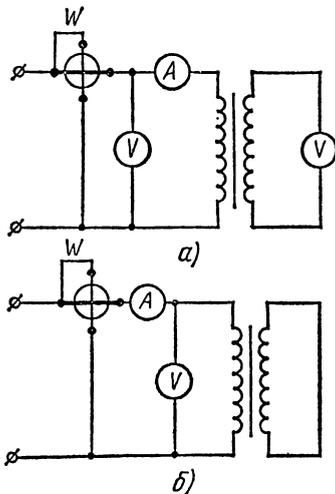


Рис. 94. Схема опыта холостого хода (а) и схема опыта короткого замыкания (б) трансформатора

трансформаторах малых мощностей этот ток достигает значения 25—30% номинального тока.

Ток холостого хода I_0 создает магнитный поток в магнитопроводе трансформатора. Для возбуждения магнитного потока трансформатор потребляет реактивную мощность из сети. Что же касается активной мощности, потребляемой трансформатором при холостом ходе, то она расходуется на покрытие потерь мощности в магнитопроводе, обусловленных гистерезисом и вихревыми токами.

Так как реактивная мощность при холостом ходе трансформатора значительно больше активной мощности, то коэффициент мощности $\cos\varphi$ его весьма мал и обычно равен 0,2—0,3.

По данным опыта холостого хода трансформатора определяется ток холостого хода I_0 , потери в стали сердечника $P_{ст}$ и коэффициент трансформации n . Ток холостого хода I_0 измеряет амперметр, включенный в цепь первичной обмотки трансформатора. При испытании трехфазного трансформатора определяется фазный ток холостого хода. О потерях в стали сердечника $P_{ст}$ судят по показаниям ваттметра, включенного в цепь первичной обмотки трансформатора. Коэффициент трансформации трансформатора равен отношению показаний вольтметров, включенных в цепь первичной и вторичной обмоток.

При коротком замыкании вторичной обмотки сопротивление трансформатора очень мало и ток короткого замыкания во много раз больше номинального. Такой большой ток вызывает сильный нагрев обмоток трансформатора и приводит к выходу его из строя. Поэтому трансформаторы снабжаются защитой, отключающей его при коротких замыканиях.

При опыте короткого замыкания (рис. 94, б) вторичная обмотка трансформатора замкнута накоротко, т. е. напряжение на зажимах вторичной обмотки равно нулю. Первичная обмотка включается в сеть с таким пониженным напряжением, при котором токи в обмотках равны номинальным. Такое пониженное напряжение называется напряжением короткого замыкания и выражается в процентах от номинального значения $u_k\%$.

По данным опыта короткого замыкания определяется напряжение короткого замыкания $u_k\%$, его активная $u_a\%$ и реактивная $u_r\%$ составляющие, потери на нагревание обмоток трансформатора $P_{обм}$ при номинальной нагрузке и активное, реактивное и полное сопротивления трансформатора при коротком замыкании R_k , X_k и Z_k . Потери в обмотках измеряются ваттметром.

Активное, реактивное и полное сопротивления короткого замыкания трансформатора определяются следующими выражениями: $Z_k = U_k/I$; $R_k = P_k/I^2$; $X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}$, где U_k , I и P_k — напряжение, ток и мощность, указываемые измерительными приборами, включенными в цепь первичной обмотки трансформатора.

При испытании трехфазного трансформатора следует в приведенных выше выражениях подставить фазные значения напряжения, тока и мощности.

Напряжение короткого замыкания и его активная и реактивная

составляющие равны: $u_a \% = \frac{I_n R_k}{U_n} \cdot 100$; $u_p \% = \frac{I_n X_k}{U_n} \cdot 100$; $u_k \% = \frac{I_n Z_k}{U_n} \cdot 100$, где U_n и I_n — номинальные напряжение и ток первичной обмотки трансформатора.

§ 73. Определение рабочих свойств трансформаторов по данным опытов холостого хода и короткого замыкания

Свойства трансформатора при работе его под нагрузкой могут быть определены непосредственным его испытанием. Если включить трансформатор на какую-либо нагрузку и изменять ее, то по показаниям приборов можно определить, каким образом будет изменяться напряжение на зажимах вторичной обмотки и кпд трансформатора. Однако при испытании трансформатора под нагрузкой происходит очень большой расход электроэнергии (тем больший, чем больше мощность трансформатора), и для создания активной, индуктивной и емкостной нагрузок необходимо громоздкое оборудование (реостаты, индуктивные катушки и конденсаторы). Кроме этого, непосредственное испытание трансформатора дает очень неточные результаты.

Рабочие свойства трансформатора могут быть определены по данным опытов холостого хода и короткого замыкания. При этом требуется сравнительно малая затрата энергии, отпадает надобность в громоздком оборудовании, кроме того значительно повышается точность измерений, чем при непосредственном испытании.

По данным опыта холостого хода измеряют напряжения на первичной и вторичной обмотках U_1 и U_2 , ток холостого хода I_0 и потребляемую при холостом ходе мощность P_0 , которая расходуется на покрытие потерь в стали магнитопровода, т. е. $P_{ст} = P_0$.

По данным опыта короткого замыкания, измеряют напряжение короткого замыкания U_k , ток первичной обмотки, равный номинальному I_n , и мощность P_k , потребляемую трансформатором при опыте короткого замыкания и расходуемую на покрытие потерь в обмотках при номинальной нагрузке, т. е. $P_{обм} = P_k$, сопротивления (полное, активное и реактивное) трансформатора при коротком замыкании Z_k , R_k и X_k , а также относительные значения напряжения короткого замыкания u_k , его активной u_a и реактивной u_p составляющих.

При испытании трехфазного трансформатора все величины определяются для одной фазы.

По данным опытов холостого хода и короткого замыкания можно найти напряжение на зажимах вторичной обмотки и кпд трансформатора при любой нагрузке.

Процентное понижение вторичного напряжения при любой нагрузке равно: $\Delta u \% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100 = \beta (u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2)$, где

$\beta = I/I_n$ — коэффициент нагрузки; I — ток при выбранной нагрузке; φ_2 — фазный сдвиг между напряжением и током вторичной обмотки.

Напряжение вторичной обмотки при нагрузке $U_2 = U_{20} \left(1 - \frac{\Delta u}{100} \right)$, где U_{20} — напряжение при холостом ходе.

Таким образом, напряжение вторичной обмотки зависит не только от величины, но и от характера нагрузки.

При индуктивном характере нагрузки напряжение понижается с ростом нагрузки в большей степени, чем при чисто активной. При емкостном характере нагрузки происходит повышение напряжения с ростом нагрузки. Задаваясь значениями β и φ_2 , можно определить Δu и U_2 при любой нагрузке трансформатора, не подвергая его испытанию под нагрузкой.

Коэффициентом полезного действия (кпд) или отдачей трансформатора называется отношение полезной мощности трансформатора P_2 к мощности, потребляемой им из сети источника электрической энергии P_1 , т. е. $\eta = P_2/P_1$.

Потребляемая мощность P_1 будет всегда больше полезной мощности P_2 , так как при работе трансформатора происходит потеря преобразуемой им энергии. Потери в трансформаторе складываются из потерь в стали магнитопровода $P_{ст}$ и потерь в обмотках $P_{обм}$.

Таким образом, потребляемую трансформатором мощность можно определить следующим выражением: $P_1 = P_2 + P_{ст} + P_{обм}$.

Полезную мощность трансформатора находят следующим образом: для однофазного $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$, для трехфазного $P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2$.

Следовательно, кпд можно определить для однофазного и трехфазного трансформатора для любой нагрузки P_2 следующими выражениями:

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{ст} + P_{обм}} \quad \text{и} \quad \eta = \frac{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2}{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_{ст} + P_{обм}}.$$

Наибольший кпд трансформатора будет при нагрузке, для которой потери в стали равны потерям в обмотках. У современных трансформаторов кпд очень высок и достигает при полной нагрузке 95—99,5%.

Задаются полезной мощностью P_2 , например 0, 25, 50, 75, 100, 125% номинальной мощности, и для каждой из выбранных мощностей определяют потери в трансформаторе.

Потери в стали магнитопровода $P_{ст}$ зависят от марки стали, из которой выполнен сердечник, от частоты тока сети и магнитной индукции в сердечнике. Так как частота тока сети и магнитная индукция остаются неизменными при работе трансформатора, то и потери в стали не зависят от нагрузки и остаются постоянными.

Потери в обмотках расходятся на нагревание проводников этих обмоток проходящими по ним токами и пропорциональны току во второй степени. Таким образом, при нагрузке 0,5 от номинальной токи в обмотках будут вдвое, а потери в обмотках в четыре раза меньшими, чем при номинальной нагрузке. Задаваясь значениями $\cos \varphi_2$, определяют кпд при любой нагрузке трансформатора.

§ 74. Автотрансформаторы

В конструктивном отношении автотрансформатор подобен трансформатору: на стальном магнитопроводе помещены две обмотки, выполненные из проводников различного поперечного сечения. Конец одной обмотки электрически соединяется с началом другой так, что две последовательно соединенные обмотки образуют общую обмотку высшего напряжения. Обмоткой низшего напряжения, являющейся частью обмотки высшего напряжения, служит одна из двух обмоток автотрансформатора. Таким образом, между обмотками высшего и низшего напряжений автотрансформатора имеется не только магнитная, но и электрическая связь.

Принципиальная схема понижающего автотрансформатора показана на рис. 95. Первичное напряжение подведено к зажимам A — x первичной обмотки с числом витков w_1 . Вторичной обмоткой является часть первичной a — x с числом витков w_2 .

При холостом ходе $I_2=0$, пренебрегая падением напряжения в активных сопротивлениях обмоток, можно записать уравнения равновесия эдс для первичной и вторичной обмоток:

$$U_1 = E_1 = 4,44w_1f\Phi_m \quad \text{и} \quad U_2 = E_2 = 4,44w_2f\Phi_m.$$

Отношение напряжения первичной и вторичной обмоток при холостом ходе называется коэффициентом трансформации и автотрансформатора, т. е. $U_1/U_2=w_1/w_2=n$.

Если вторичную обмотку автотрансформатора замкнуть на какой-либо приемник энергии, то во вторичной цепи будет проходить ток I_2 . Пренебрегая потерями энергии, мощность, потребляемую автотрансформатором из сети, можно принять равной мощности, отдаваемой во вторичную сеть, т. е. $P=U_1I_1=U_2I_2$, откуда $I_1/I_2=w_2/w_1=1/n$.

Таким образом, основные соотношения трансформатора остаются без изменения в автотрансформаторах.

В общей части обмотки a — x , принадлежащей сети высшего и низшего напряжения, проходят токи I_1 и I_2 , направленные встречно.

Если пренебречь током холостого хода, величина которого очень мала, то можно считать, что токи I_1 и I_2 сдвинуты по фазе на 180° и ток I_{12} в части обмотки a — x равен арифметической разности токов вторичной и первичной цепей, т. е.

$$I_{12} = I_2 - I_1 = I_2(1 - 1/n).$$

В понижающем автотрансформаторе ток I_{12} совпадает по направлению с током I_2 , в повышающем — направлен противоположно току I_2 .

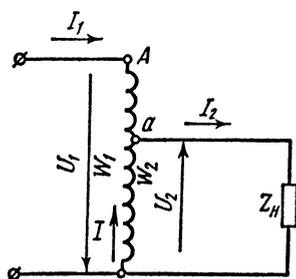


Рис. 95. Схема понижающего автотрансформатора

Преимуществом автотрансформатора перед трансформатором той же полезной мощности является меньший расход активных материалов — обмоточного провода и стали, меньшие потери энергии, более высокий кпд, меньшее изменение напряжения при изменении нагрузки.

Масса провода обмоток автотрансформатора меньше массы провода обмоток трансформатора при одинаковых плотностях тока. Это объясняется тем, что у трансформатора на магнитопроводе имеются две обмотки — первичная с числом витков w_1 , поперечное сечение провода которой рассчитано на ток I_1 , и вторичная с числом витков w_2 , поперечное сечение провода которой рассчитано на ток I_2 . У автотрансформатора также две обмотки, но одна из них (часть A — a) имеет число витков ($w_1 - w_2$) из провода, поперечное сечение которого рассчитано на ток I_1 , а другая (часть a — x) с числом витков w_2 из провода, поперечное сечение которого рассчитано на разность токов $I_2 - I_1 = I_{12}$.

Поперечное сечение и масса стали магнитопровода автотрансформатора также меньше сечения и массы стали магнитопровода трансформатора. Это объясняется тем, что в трансформаторе энергия из первичной сети во вторичную передается магнитным путем в результате электромагнитной связи между обмотками. В автотрансформаторе энергия из первичной сети во вторичную частично передается путем электрического соединения первичной и вторичной сети, т. е. электрическим путем. Так как в процессе передачи этой энергии магнитный поток не участвует, у автотрансформатора электромагнитная мощность меньше, чем у трансформатора.

Полезная мощность автотрансформатора при активной нагрузке равна: $P_2 = U_2 I_2$. Имея в виду, что $I_2 = I_1 + I_{12}$, получим: $P_2 = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = P_d + P_m$, где P_m — электромагнитная мощность автотрансформатора, определяющая необходимый магнитный поток, поперечное сечение и массу стали магнитопровода. Эта мощность является расчетной или габаритной мощностью автотрансформатора.

Наряду с преимуществами автотрансформаторов перед трансформаторами они имеют существенные недостатки: малое сопротивление короткого замыкания, что обуславливает большую кратность тока короткого замыкания; возможность попадания высшего напряжения в сеть низшего напряжения из-за электрической связи между этими сетями. Наличие электрической связи между сетью источника и приемника энергии делает невозможным применять автотрансформатор в том случае, когда приемник энергии имеет заземленный полюс (в выпрямительных устройствах).

Достоинства автотрансформаторов будут выражены тем сильнее, чем коэффициент трансформации ближе к единице. Поэтому автотрансформаторы применяют при небольших коэффициентах трансформации ($n = 1 \div 2$).

В трехфазных сетях используют трехфазные автотрансформаторы, обмотки которых обычно соединяются звездой.

§ 75. Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы делятся на трансформаторы напряжения и трансформаторы тока. Их применяют в цепях переменного тока для расширения пределов измерения измерительных приборов и для изоляции этих приборов от токопроводящих частей, находящихся под высоким напряжением.

Трансформаторы напряжения конструктивно представляют собой обычные трансформаторы малой мощности. Первичная обмотка такого трансформатора включается в два линейных провода сети, напряжение которой измеряется или контролируется; во вторичную обмотку включают вольтметр или параллельную обмотку ваттметра, счетчика или другого измерительного прибора. Коэффициент трансформации трансформатора напряжения выбирают таким, чтобы при номинальном первичном напряжении напряжение вторичной обмотки было 100 В.

Режим работы трансформатора напряжения подобен режиму холостого хода обычного трансформатора, так как сопротивление вольтметра или параллельной обмотки ваттметра, счетчика и т. п. велико и током во вторичной обмотке можно пренебречь.

Включение во вторичную обмотку большого числа измерительных приборов нежелательно. Если параллельно вольтметру, включенному во вторичную обмотку трансформатора, подсоединить еще один вольтметр или параллельную обмотку ваттметра, счетчика и т. п., то ток во вторичной обмотке трансформатора увеличится, что вызовет падение напряжения на зажимах вторичной обмотки, и точность показания приборов понизится.

Трансформаторы тока служат для преобразования переменного тока большой величины в ток малой величины и изготавливаются таким образом, чтобы при номинальном токе первичной цепи во вторичной обмотке ток был 5 А.

Первичная обмотка трансформатора тока включается в разрез линейного провода (последовательно с нагрузкой), ток в котором измеряется; вторичная обмотка замкнута на амперметр или на последовательную обмотку ваттметра, счетчика и т. п., т. е. соединена с измерительным прибором, имеющим малое сопротивление.

Режим работы трансформатора тока существенно отличается от режима работы обычного трансформатора. В обычном трансформаторе при изменении нагрузки магнитный поток в сердечнике остается практически неизменным, если постоянно приложенное напряжение.

Если в обычном трансформаторе уменьшить нагрузку, т. е. силу тока во вторичной обмотке, то и в первичной обмотке сила тока понизится, и если вторичную обмотку разомкнуть, то сила тока в первичной обмотке уменьшится до тока холостого хода I_0 .

При работе трансформатора тока его вторичная обмотка замкнута на измерительный прибор с малым сопротивлением и режим работы трансформатора близок к короткому замыканию. Поэтому магнитный поток в магнитопроводе трансформатора мал.

Если разомкнуть вторичную обмотку трансформатора тока, то

тока в этой обмотке не будет, тогда как в первичной обмотке ток остается неизменным.

Таким образом, при разомкнутой вторичной обмотке трансформатора тока магнитный поток в магнитопроводе, возбужденный током первичной обмотки и не встречающий размагничивающего действия тока вторичной обмотки, окажется очень большим и, следовательно, эдс вторичной обмотки, имеющей большое число витков, достигает величины, опасной для целостности изоляции этой обмотки и для обслуживающего персонала. Поэтому при выключении измерительных приборов из вторичной обмотки трансформатора тока эту обмотку необходимо замкнуть накоротко.

Включение большого числа измерительных приборов во вторичную обмотку трансформатора тока снижает точность измерения.

Конструкции трансформаторов тока в зависимости от назначения чрезвычайно разнообразны и делятся на стационарные и переносные.

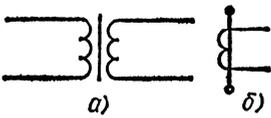


Рис. 96. Схема измерительных трансформаторов:
а — напряжения, б — тока

При работе измерительных трансформаторов напряжения и тока возможен пробой изоляции их первичных обмоток и, как следствие пробоя, электрическое соединение первичной обмотки с сердечником или со вторичной обмоткой.

Для безопасности обслуживания сердечники и вторичные обмотки измерительных трансформаторов заземляются.

Условные обозначения измерительных трансформаторов показаны на рис. 96.

Контрольные вопросы

1. Объясните назначение и принцип действия трансформаторов.
2. Какую форму имеют магнитопроводы однофазных трансформаторов?.
3. Как устроен магнитопровод и обмотки трансформаторов?
4. Каким выражением определяется действующее значение эдс обмотки трансформатора?
5. Изменится ли ток в первичной обмотке трансформатора, если при изменении нагрузки увеличился ток во вторичной обмотке?
6. Что называется коэффициентом трансформации?
7. Как производят опыты холостого хода и короткого замыкания трансформатора и какие параметры его определяются из этих опытов?
8. При какой нагрузке трансформатор имеет наибольший кпд?
9. Каковы достоинства и недостатки автотрансформатора по сравнению с трансформаторами?
10. Поясните назначение и схемы включения измерительных трансформаторов.

Глава VIII

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

§ 76. Общие сведения об электрических машинах

Электрические машины широко применяют на электрических станциях, в промышленности, на транспорте, в авиации, в системах автоматического регулирования и управления, в быту.

Электрические машины преобразуют механическую энергию в электрическую и наоборот. Машина, преобразующая механическую энергию в электрическую, называется генератором. Преобразование электрической энергии в механическую осуществляется двигателями.

Любая электрическая машина может быть использована как в качестве генератора, так и в качестве двигателя. Это свойство электрической машины изменять направление преобразуемой ею энергии называется обратимостью машины. Электрическая машина может быть также использована для преобразования электрической энергии одного рода тока (частоты, числа фаз переменного тока, напряжения постоянного тока) в энергию другого рода тока. Такие электрические машины называются преобразователями.

В зависимости от рода тока электроустановки, в которой должна работать электрическая машина, они делятся на машины постоянного и машины переменного тока. Машины переменного тока могут быть как однофазными, так и многофазными. Наиболее широкое применение нашли трехфазные синхронные и асинхронные машины, а также коллекторные машины переменного тока, которые допускают экономичное регулирование частоты вращения в широких пределах.

Принцип действия электрических машин основан на использовании законов электромагнитной индукции и электромагнитных сил. Если в магнитном поле полюсов постоянных магнитов или электромагнитов (рис. 97) поместить проводник и под действием какой-либо силы F_1 перемещать его перпендикулярно магнитным линиям, то в нем возникает эдс, равная: $E = Blv$, где B — магнитная индукция в месте, где находится проводник; l — активная длина проводника (та часть, которая находится в магнитном поле); v — скорость перемещения проводника в магнитном поле.

Направление эдс (на рисунке от зрителя за плоскость чертежа), индуцируемой в проводнике, определяется согласно правилу правой руки.

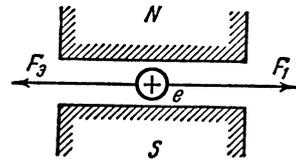


Рис. 97. Схема, поясняющая принцип действия электрической машины

Если этот проводник замкнуть на какой-либо приемник энергии, то в замкнутой цепи под действием эдс будет протекать ток, совпадающий по направлению с эдс в проводнике. В результате взаимодействия тока в проводнике с магнитным полем полюсов создается электромагнитная сила F_a , направление которой определяется по правилу левой руки; эта сила будет направлена навстречу силе, перемещающей проводник в магнитном поле. При равенстве сил $F_1 = F_a$ проводник будет перемещаться с постоянной скоростью.

Следовательно, в такой простейшей электрической машине механическая энергия, затрачиваемая на перемещение проводника, преобразуется в энергию электрическую, отдаваемую сопротивлению внешнего приемника энергии, т. е. машина работает генератором. Та же простейшая электрическая машина может работать двигателем. Если от постороннего источника электрической энергии через проводник пропустить ток, то в результате взаимодействия тока в проводнике с магнитным полем полюсов создается электромагнитная сила F_a , под действием которой проводник начнет перемещаться в магнитном поле, преодолевая силу торможения какого-либо механического приемника энергии. Таким образом, рассмотренная машина так же, как и любая электрическая машина, обратима, т. е. может работать как генератором, так и двигателем.

Для увеличения эдс и электромеханических сил электрические машины имеют обмотки, состоящие из большого числа проводов, которые соединяются между собой так, чтобы эдс в них были одинаково направлены и складывались.

Эдс в проводнике будет индуцирована также и в том случае, когда проводник неподвижен, а перемещается магнитное поле полюсов.

§ 77. Принцип действия асинхронного двигателя

Наибольшее распространение среди электрических двигателей получил трехфазный асинхронный двигатель, впервые сконструированный известным русским электриком М. О. Доливо-Добровольским.

Асинхронный двигатель отличается простотой конструкции и несложностью обслуживания. Как и любая машина переменного тока, асинхронный двигатель состоит из двух основных частей: статора и ротора. С т а т о р о м называется неподвижная часть машины, р о т о р о м — ее вращающаяся часть. Асинхронная машина обладает свойством обратимости, т. е. может быть использована как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Из-за ряда существенных недостатков асинхронные генераторы практически почти не применяются, тогда как асинхронные двигатели получили очень широкое распространение.

Многофазная обмотка переменного тока создает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого в минуту $n_1 = \frac{60f_1}{p}$.

Если ротор вращается с частотой, равной частоте вращения магнитного поля ($n_2 = n_1$), то такая частота называется с и н х р о н н о й.

Если ротор вращается с частотой, не равной частоте вращения магнитного поля ($n_2 \neq n_1$), то такая частота называется асинхронной.

В асинхронном двигателе рабочий процесс может протекать только при асинхронной частоте, т. е. при частоте вращения ротора, не равной частоте вращения магнитного поля.

Частота вращения ротора может очень мало отличаться от частоты вращения поля, но при работе двигателя она будет всегда меньше ($n_2 < n_1$).

Работа асинхронного двигателя основана на явлении, названном «диск Араго — Ленца» (рис. 98). Это явление заключается в следующем: если перед полюсами постоянного магнита поместить медный диск 1, свободно сидящий на оси 2, и начать вращать магнит вокруг его оси при помощи рукоятки, то медный диск будет вращаться в том же направлении. Это объясняется тем, что при вращении магнита его магнитное поле пронизывает диск и индуцирует в нем вихревые токи. В результате взаимодействия вихревых токов с магнитным полем магнита возникает сила, приводящая диск во вращение. На основании закона Ленца направление всякого индуцированного тока таково, что он противодействует причине, его вызвавшей. Поэтому вихревые токи в теле диска стремятся задержать вращение магнита, но, не имея возможности сделать это, приводят диск во вращение так, что он следует за магнитом. При этом частота вращения диска всегда меньше, чем частота вращения магнита. Если бы эти частоты почему-либо стали одинаковыми, то магнитное поле не перемещалось бы относительно диска и, следовательно, в нем не возникли бы вихревые токи, т. е. не было бы силы, под действием которой диск вращается.

В асинхронных двигателях постоянный магнит заменен вращающимся магнитным полем, создаваемым трехфазной обмоткой статора при включении ее в сеть переменного тока.

Вращающееся магнитное поле статора пересекает проводники обмотки ротора и индуцирует в них эдс. Если обмотка ротора замкнута на какое-либо сопротивление или накоротко, то по ней под действием индуцируемой эдс проходит ток. В результате взаимодействия тока в обмотке ротора с вращающимся магнитным полем обмотки статора создается вращающийся момент, под действием которого ротор начинает вращаться по направлению вращения магнитного поля.

Если предположить, что в какой-то момент времени частота вращения ротора оказалась равной частоте вращения поля статора, то проводники обмотки ротора не будут пересекать магнитное поле статора и тока в роторе не будет. В этом случае вращающийся момент станет равным нулю, и частота вращения ротора уменьшится по сравнению с частотой вращения поля статора, пока не возникнет вращающийся момент, уравновешивающий тормозной момент, который складывается из момента нагрузки на валу и момента сил трения в машине.

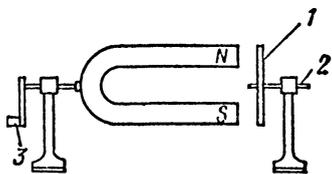


Рис. 98. Схема, поясняющая принцип действия асинхронного двигателя:

1 — диск, 2 — ось, 3 — рукоятка

Для изменения направления вращения ротора, т. е. для реверсирования двигателя, необходимо изменить направление вращения магнитного поля, созданного обмоткой статора. Это достигается изменением чередования фаз обмоток статора, для чего следует поменять местами по отношению к зажимам сети любые два из трех проводов, соединяющих обмотку статора с сетью. Реверсивные двигатели снабжаются переключателями, при помощи которых можно изменять чередование фаз обмоток статора, а следовательно, и направление вращения ротора.

Вне зависимости от направления вращения ротора его частота n_2 , как уже указывалось, всегда меньше частоты вращения магнитного поля статора.

§ 78. Устройство асинхронного двигателя

Сердечник 1 статора (рис. 99) набирается из стальных пластин толщиной 0,35 или 0,5 мм. Пластины штампуют с впадинами (пазами), изолируют лаком или окалиной для уменьшения потерь на вихревые токи, собирают в отдельные пакеты и крепят в станине 3 двигателя.

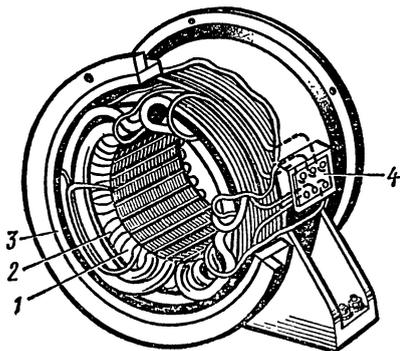


Рис. 99. Устройство статора асинхронного двигателя:

1 — сердечник, 2 — обмотка, 3 — станина, 4 — щиток

К станине прикрепляют также боковые щиты с помещенными на них подшипниками, на которые опирается вал ротора. Станину устанавливают на фундаменте.

В продольные пазы статора укладывают проводники его обмотки 2, которые соединяют между собой так, что образуется трехфазная система. На щитке 4 машины имеется шесть зажимов, к которым присоединяются начала и концы обмоток каждой фазы. Для подключения обмоток статора к трехфазной сети они могут быть соединены звездой или треугольником, что дает возможность включать двигатель в сеть

с двумя различными линейными напряжениями. Например, двигатель может работать от сети с напряжением 220 и 127 В. На щитке машины указаны оба напряжения сети, на которые рассчитан двигатель, т. е. 220/127 В или 380/220 В.

Для более низких напряжений, указанных на щитке, обмотка статора соединяется треугольником, для более высоких — звездой.

При соединении обмотки статора треугольником на щитке машины верхние зажимы объединяют перемычками с нижними (рис. 100), а каждую пару соединенных вместе зажимов подключают к линейным проводам трехфазной сети. Для включения звездой три нижних зажима на щитке соединяют перемычками в общую точку, а верхние подключают к линейным проводам трехфазной сети.

Сердечник 1 ротора (рис. 101, а) также набирают из стальных

пластин толщиной 0,5 мм, изолированных лаком или окалиной для уменьшения потерь на вихревые токи. Пластины штампуют с впадинами и собирают в пакеты, которые крепят на валу машины. Из пакетов образуется цилиндр с продольными пазами, в которых укладывают проводники 2 обмотки ротора. В зависимости от типа обмотки асинхронные машины могут быть с фазным и короткозамкнутым роторами. Короткозамкнутая обмотка ротора выполняется по типу беличьего колеса (рис. 101, б). В пазах ротора укладывают массивные стержни, соединенные на торцовых сторонах медными кольцами 3 (см. рис. 101, а). Часто короткозамкнутую обмотку ротора изготавливают из алюминия. Алюминий в горячем состоянии заливают в пазы ротора под давлением. Такая обмотка всегда замкнута накоротко и включение сопротивлений в нее невозможно. Фазная обмотка ротора выполнена подобно статорной, т. е. проводники соответствующим образом соединены между собой, образуя трехфазную систему. Обмотки трех фаз соединены звездой. Начала этих обмоток подключены к трем контактными медными кольцам, укрепленным на валу ротора. Кольца изолированы друг от друга и от вала и вращаются вместе с ротором. При вращении колец поверхности их скользят по угольным или медным щеткам, неподвижно укрепленным над кольцами. Обмотка ротора может быть замкнута на какое-либо сопротивление или накоротко при помощи указанных выше щеток.

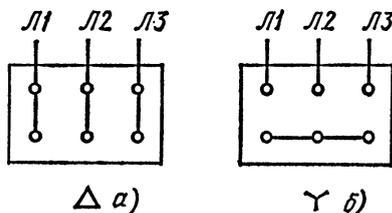


Рис. 100. Соединение зажимов на щитке двигателя при включении обмотки статора:

а — треугольником, б — звездой

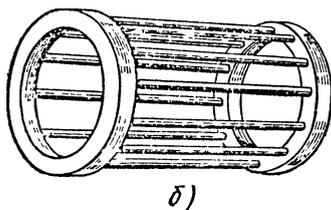
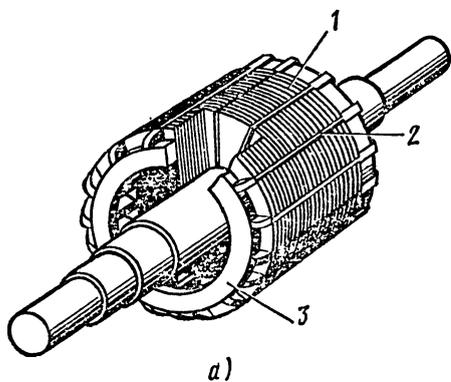


Рис. 101. Ротор короткозамкнутого асинхронного двигателя:

а — устройство, б — обмотка; 1 — сердечник, 2 — проводники, 3 — медные кольца

замкнутым ротором проще и надежнее в эксплуатации, значительно дешевле, чем двигатели с фазным ротором. Однако двигатели с фазным ротором, как мы увидим ниже, обладают лучшими пусковыми и регулировочными свойствами.

В настоящее время асинхронные двигатели выполняют преимущественно с короткозамкнутым ротором и лишь при больших мощностях и в специальных случаях используют фазную обмотку ротора.

В СССР производят асинхронные двигатели мощностью от нескольких десятков ватт до 15 000 кВт при напряжениях обмотки статора до 6 кВ.

Между статором и ротором имеется воздушный зазор, величина которого оказывает существенное влияние на рабочие свойства двигателя.

Наряду с важными положительными качествами — простотой конструкции и обслуживания, малой стоимостью — асинхронный двигатель имеет и некоторые недостатки, из которых наиболее существенным является относительно низкий коэффициент мощности ($\cos\varphi$). У асинхронного двигателя $\cos\varphi$ при полной нагрузке может достигать значений 0,85—0,9; при недогрузках двигателя его $\cos\varphi$ резко уменьшается и при холостом ходе составляет 0,2—0,3.

Низкий коэффициент мощности асинхронного двигателя объясняется большим потреблением реактивной мощности, которая необходима для возбуждения магнитного поля. Магнитный поток в асинхронном двигателе встречает на своем пути воздушный зазор между статором и ротором, который в большой степени увеличивает магнитное сопротивление, а следовательно, и потребляемую двигателем реактивную мощность.

В целях повышения коэффициента мощности асинхронных двигателей воздушный зазор стремятся делать возможно меньшим, доводя его у малых двигателей (порядка 2—5 кВт) до 0,3 мм. В двигателях большой мощности воздушный зазор приходится увеличивать по конструктивным соображениям, но все же он не превышает 2—2,5 мм.

§ 79. Работа асинхронного двигателя под нагрузкой

В рабочем режиме ротор двигателя вращается с частотой n_2 , меньшей частоты n_1 магнитного поля статора, вращающегося в том же направлении, что и ротор. Поэтому магнитное поле, имеющее большую частоту, скользит относительно ротора с частотой (об/мин), равной разности частот поля и ротора, т. е. $n_s = n_1 - n_2$.

Относительное отставание ротора от вращающегося магнитного поля статора характеризуется скольжением S .

Скольжение представляет собой отношение разности частот вращения магнитного поля статора и вращающегося ротора к частоте поля статора

$$S = n_s/n_1 = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

Эта формула определяет скольжение в относительных единицах. Скольжение может быть также выражено в процентах:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%.$$

Если ротор неподвижен ($n_2 = 0$), то скольжение равно единице или 100%.

Если ротор вращается синхронно с магнитным полем, т. е. с одинаковой частотой ($n_2 = n_1$), то скольжение равно нулю.

Таким образом, чем больше частота вращения ротора, тем меньше скольжение.

В рабочем режиме асинхронного двигателя скольжение мало. У современных асинхронных двигателей скольжение при полной нагрузке составляет 3—5%, т. е. ротор вращается с частотой, незначительно отличающейся от частоты магнитного поля статора.

При холостом ходе, т. е. при отсутствии нагрузки на валу, скольжение ничтожно мало и может быть принято равным нулю.

Частоту вращения ротора можно определить из следующих соотношений:

$$n_2 = n_1 - n_s = n_1 (1 - S) = \frac{60f_1}{p} (1 - S).$$

Двигатель будет работать устойчиво с постоянной частотой вращения ротора при равновесии моментов, т. е. если вращающий момент двигателя M будет равен тормозному моменту на валу двигателя M_T , который развивает приемник механической энергии, например резец токарного станка. Следовательно, можно записать: $M = M_T$.

Любой нагрузке машины соответствует определенная частота вращения ротора n_2 и определенное скольжение S .

Магнитное поле статора вращается относительно ротора с частотой n_s и индуцирует в его обмотке эдс E_2 , под действием которой по замкнутой обмотке ротора проходит ток I_2 .

Если нагрузка на валу машины увеличилась, т. е. возрос тормозной момент, то равновесие моментов будет нарушено, так как тормозной момент окажется больше вращающего. Это приведет к уменьшению частоты вращения ротора, а следовательно, к увеличению скольжения. С увеличением скольжения магнитное поле статора будет пересекать проводники обмотки ротора чаще, эдс E_2 , индуцированная в обмотке ротора, возрастет, а в результате увеличится как ток в роторе, так и развиваемый двигателем вращающий момент. Скольжение и ток в роторе будут увеличиваться до значений, при которых вновь наступит равновесие моментов, т. е. вращающий момент станет равным тормозному.

Так же протекает процесс изменения частоты вращения ротора и развиваемого момента при уменьшении нагрузки двигателя. С уменьшением нагрузки на валу двигателя тормозной момент становится меньше вращающего, что приводит к увеличению частоты вращения ротора или к уменьшению скольжения. В результате уменьшаются эдс и ток в обмотке ротора, а следовательно, и вращающий момент, который вновь становится равным тормозному моменту.

Магнитное поле статора пересекает проводники обмотки статора и индуцирует в ней эдс E_1 , которая уравнивает приложенное напряжение сети U_1 .

Если пренебречь падением напряжения в сопротивлении обмотки статора, которое мало по сравнению с эдс, то между абсолютными значениями приложенного напряжения и эдс обмотки статора можно допустить приближенное равенство, т. е. $U_1 = E_1$.

Таким образом, при неизменном напряжении сети будет неизменна и эдс обмотки статора. Следовательно, магнитный поток в воздушном

вазоре машины, так же как в трансформаторе, при любом изменении нагрузки остается примерно постоянным.

Ток обмотки ротора создает свое магнитное поле, которое направлено противоположно магнитному полю тока обмотки статора. Чтобы результирующий магнитный поток в машине оставался неизменным при любом изменении нагрузки двигателя, размагничивающее магнитное поле обмотки ротора должно быть уравновешено магнитным полем обмотки статора. Поэтому при увеличении тока в обмотке ротора увеличивается и ток в обмотке статора.

Таким образом, асинхронный двигатель подобен трансформатору, у которого при увеличении тока во вторичной обмотке увеличивается ток в первичной обмотке.

§ 80. Вращающий момент асинхронного двигателя

Вращающий момент асинхронного двигателя создается при взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с токами в проводниках обмотки ротора. Поэтому вращающий момент зависит как от магнитного потока статора Φ_m , так и от тока в обмотке ротора I_2 . Однако в процессе преобразования энергии (создании вращающего момента) участвует только активная мощность, потребляемая машиной из сети. Вследствие этого вращающий момент зависит не от тока в обмотке ротора I_2 , а только от его активной составляющей, т. е. $I_2 \times \cos \psi_2$, где ψ_2 — фазный угол между эдс и током в обмотке ротора.

Таким образом, вращающий момент асинхронного двигателя определяется следующим выражением:

$$M = C \Phi_m I_2 \cos \psi_2,$$

где C — конструктивная постоянная машины, зависящая от числа ее полюсов и фаз, числа витков обмотки статора и конструктивного выполнения обмотки.

При условии постоянства приложенного напряжения магнитный поток остается также почти постоянным при любом изменении нагрузки двигателя.

Таким образом, в выражении вращающего момента величины Φ_m и C постоянны и вращающий момент пропорционален только активной составляющей тока в обмотке ротора, т. е. $M \sim I_2 \cos \psi_2$.

Изменение нагрузки или тормозного момента на валу двигателя изменяет частоту вращения ротора и скольжение, что вызовет изменение как тока в роторе I_2 , так и его активной составляющей $I_2 \cos \psi_2$.

Можно ток в роторе определить отношением эдс к полному сопротивлению, т. е.

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} \text{ и}$$
$$\cos \psi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}},$$

где Z_2 , R_2 и X_2 — полное, активное и реактивное сопротивления фазы обмотки ротора.

Вместе со скольжением изменяется частота тока ротора. При неподвижном роторе ($n_2=0$ и $S=1$) вращающееся поле с одинаковой частотой пересекает проводники обмотки статора и ротора и частота тока в роторе равна частоте тока в сети ($f_2=f_1$). При уменьшении скольжения обмотка ротора пересекается магнитным полем с меньшей частотой, так что частота тока в роторе уменьшается. Когда ротор вращается синхронно с полем ($n_2=n_1$ и $S=0$), проводники обмотки ротора не пересекаются магнитным полем, так что частота тока в роторе равна нулю $f_2=0$. Таким образом, частота тока в роторе пропорциональна скольжению, т. е. $f_2=Sf_1$.

Активное сопротивление обмотки ротора почти не зависит от частоты, тогда как эдс и реактивное сопротивление пропорциональны частоте, т. е. изменяются с изменением скольжения, и могут быть определены следующими выражениями:

$$E_2 = SE \quad \text{и} \quad X_2 = SX,$$

где E и X — соответственно эдс и индуктивное сопротивление фазы обмотки неподвижного ротора.

Таким образом, имеем:

$$I_2 = \frac{SE}{\sqrt{R_2^2 + (SX)^2}} \quad \text{и} \quad \cos \psi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (SX)^2}}$$

и вращающий момент

$$M \sim I_2 \cos \psi_2 = \frac{SER_2}{R_2^2 + (SX)^2}.$$

Следовательно, при небольших скольжениях (примерно до 20%), когда SX мало по сравнению с R_2 , увеличение скольжения вызывает повышение вращающего момента, так как при этом возрастает активная составляющая тока в роторе ($I_2 \cos \psi_2$). При больших скольжениях ($SX > R_2$) увеличение скольжения будет вызывать уменьшение вращающего момента. Таким образом, хотя и возрастает ток в роторе I_2 , но его активная составляющая $I_2 \cos \psi_2$ и, следовательно, вращающий момент уменьшатся вследствие значительного повышения реактивного сопротивления обмотки ротора.

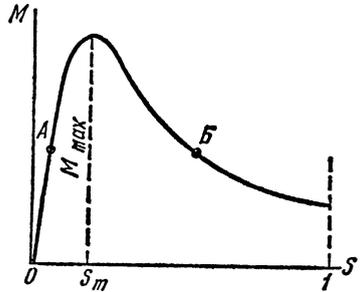


Рис. 102. Зависимость вращающего момента асинхронного двигателя от скольжения

На рис. 102 показана зависимость вращающего момента от скольжения. При некотором скольжении S_m (примерно 20%) двигатель развивает максимальный момент, который определяет перегрузочную способность двигателя и обычно в 2—3 раза превышает номинальный момент.

Устойчивая работа двигателя возможна только на восходящей ветви кривой зависимости момента от скольжения, т. е. при изменении скольжения в пределах от 0 до S_m . Работа двигателя на нисхо-

дящей ветви указанной зависимости, т. е. при скольжении $S > S_m$ невозможна, так как не обеспечивается устойчивое равновесие моментов.

Если предположить, что вращающий момент был равен тормозному ($M = M_T$) в точках A и B , то при случайном нарушении равновесия моментов в одном случае оно восстанавливается, а в другом не восстанавливается. Допустим, что вращающий момент двигателя почему-либо уменьшился (например, при понижении напряжения сети), тогда скольжение начнет увеличиваться. Если равновесие моментов было в точке A , то увеличение скольжения вызовет увеличение вращающего момента двигателя и он станет вновь равным тормозному моменту, т. е. равновесие моментов восстановится. Если же равновесие моментов было в точке B , то увеличение скольжения вызовет уменьшение вращающего момента, который будет оставаться всегда меньше тормозного, т. е. равновесие моментов не восстановится и частота вращения ротора будет непрерывно уменьшаться до полной остановки двигателя.

Если приложить к валу двигателя тормозной момент, бóльший максимального момента, то равновесие моментов нарушится и ротор двигателя остановится.

Вращающий момент двигателя пропорционален квадрату приложенного напряжения, так как пропорциональны напряжению как магнитный поток, так и ток в роторе. Поэтому изменение напряжения в сети вызывает значительное изменение вращающего момента.

§ 81. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочие характеристики асинхронного двигателя представляют собой зависимости скольжения S , частоты вращения ротора n_2 , развиваемого момента M , потребляемого тока I_1 , расходуемой мощности P_1 , коэффициента мощности $\cos \varphi$ и кпд η от полезной мощности P_2 на валу машины. Эти характеристики (рис. 103) снимаются при естественных условиях работы двигателя, т. е. двигатель нерегулируемый, частота тока f_1 и напряжение U_1 сети остаются постоянными, а изменяется только нагрузка на валу двигателя.

При увеличении нагрузки на валу двигателя скольжение возрастает, причем при больших нагрузках скольжение увеличивается несколько быстрее, чем при малых.

При холостом ходе двигателя скольжение очень мало ($n_2 \sim n_1$ или $S \sim 0$).

При номинальной нагрузке скольжение обычно составляет $S = 3-5\%$.

$$\text{Частота вращения ротора } n_2 = n_1 (1 - S) = \frac{60f_1}{p} (1 - S).$$

При увеличении нагрузки на валу двигателя скольжение возрастает, а частота вращения будет уменьшаться. Однако изменение частоты вращения при увеличении нагрузки от 0 до номинальной очень незначительно и не превышает 5%. Поэтому скоростная характеристика

асинхронного двигателя является жесткой — она имеет очень малый наклон к горизонтальной оси.

Вращающий момент M , развиваемый двигателем, уравновешен тормозным моментом M_T на валу и моментом M_0 , идущим на преодоление механических потерь, т. е. $M = M_T + M_0 = P_2 / \Omega_2 - M_0$, где P_2 — полезная мощность двигателя, Ω_2 — угловая скорость ротора.

При холостом ходе двигателя $M = M_0$; с увеличением нагрузки на валу вращающий момент также увеличивается, причем за счет некоторого уменьшения частоты вращения ротора увеличение вращающего момента происходит быстрее, чем увеличение полезной мощности на валу.

Ток I_1 , потребляемый двигателем из сети, неравномерно изменяется с увеличением нагрузки на валу двигателя. При холостом ходе $\cos \varphi$ мал и ток имеет большую реактивную составляющую. При малых нагрузках на валу двигателя активная составляющая тока статора меньше реактивной составляющей, поэтому активная составляющая тока незначительно влияет на ток I_1 , определяющийся в основном реактивной составляющей. При больших нагрузках активная составляющая тока статора становится больше реактивной и изменение нагрузки вызывает большое изменение тока I_1 .

Графически зависимость потребляемой двигателем мощности P_1 выражается прямой линией, незначительно отклоняющейся вверх от прямой при больших нагрузках, что объясняется увеличением потерь в обмотках статора и ротора с возрастанием нагрузки.

Коэффициент мощности изменяется в зависимости от нагрузки на валу двигателя следующим образом. При холостом ходе $\cos \varphi$ мал (порядка 0,2), так как активная составляющая тока статора, обусловленная потерями мощности в машине, мала по сравнению с реактивной составляющей этого тока, создающей магнитный поток. При увеличении нагрузки на валу $\cos \varphi$ возрастает (достигая наибольшего значения 0,8—0,95) в результате увеличения активной составляющей тока статора. При очень больших нагрузках происходит некоторое уменьшение $\cos \varphi$, так как вследствие значительного увеличения скольжения и частоты тока в роторе возрастает реактивное сопротивление обмотки ротора.

Кривая кпд η имеет такой же вид, как в любой машине или трансформаторе. При холостом ходе кпд равен нулю. С увеличением нагрузки на валу двигателя кпд резко увеличивается, а затем уменьшается. Наибольшего значения кпд достигает при такой нагрузке, когда потери мощности в стали и механические потери, не зависящие от нагрузки, равны потерям мощности в обмотках статора и ротора, зависящим от нагрузки.

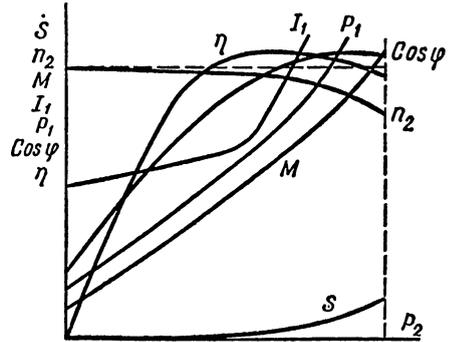


Рис. 103. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

§ 82. Пуск в ход асинхронных двигателей

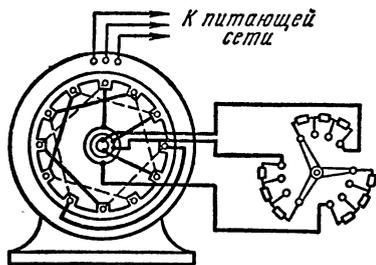
При включении асинхронного двигателя в сеть переменного тока по обмоткам его статора и ротора будут проходить токи, в несколько раз больше номинальных. Это объясняется тем, что при неподвижном роторе вращающееся магнитное поле пересекает его обмотку с большой частотой, равной частоте вращения магнитного поля в пространстве, и индуцирует в этой обмотке большую эдс. Эта эдс создает большой ток в цепи ротора, что вызывает возникновение соответствующего тока и в обмотке статора.

При увеличении частоты вращения ротора скольжение уменьшается, что приводит к уменьшению эдс и тока в обмотке ротора. Это, в свою очередь, вызывает уменьшение тока в обмотке статора.

Большой пусковой ток нежелателен как для двигателя, так и для источника, от которого двигатель получает энергию. При частых пусках большой ток приводит к резкому повышению температуры обмоток двигателя, что может вызвать преждевременное старение их изоляции. В сети при больших токах понижается напряжение, которое оказывает влияние на работу других приемников энергии, включенных в эту же сеть. Поэтому прямой пуск двигателя непосредственным включением его в сеть допускается только в том случае, когда мощность двигателя намного меньше мощности источника энергии, питающего сеть.

Если мощность двигателя соизмерима с мощностью источника энергии, то необходимо уменьшить ток, потребляемый этим двигателем при пуске в ход.

Рис. 104. Схема включения пускового реостата в цепь фазного ротора асинхронного двигателя



Двигатели с фазным ротором обладают очень хорошими пусковыми свойствами. Для уменьшения пускового тока обмотку ротора замыкают на активное сопротивление, называемое пусковым реостатом (рис. 104). При включении такого сопротивления в цепь обмотки ротора ток в ней уменьшается, а следовательно, уменьшаются токи как в обмотке статора, так и потребляемый двигателем из сети. При этом увеличится активная составляющая тока ротора и, следовательно, вращающий момент, развиваемый двигателем при пуске в ход.

Пусковые реостаты имеют несколько контактов, поэтому можно постепенно уменьшать сопротивление, введенное в цепь обмотки ротора. После достижения ротором нормальной частоты вращения реостат полностью выводится, т. е. обмотку ротора замыкают накоротко.

При нормальной частоте ротора скольжение мало и эдс, индуцируемая в его обмотке, также незначительна. Поэтому никакие добавочные сопротивления в цепи ротора не нужны.

Пусковые реостаты работают непродолжительное время в процессе разгона двигателя и рассчитываются на кратковременное действие. Если оставить реостат включенным длительное время, то он выйдет из строя.

Двигатели с короткозамкнутым ротором при малой мощности их по сравнению с мощностью источника энергии пускают в ход непосредственным включением в сеть. При большой же мощности двигателей пусковой ток уменьшают, понижая приложенное напряжение. Для понижения напряжения на время пуска двигатель включают в сеть через понижающий автотрансформатор или реакторы. При вращении ротора с нормальной частотой вращения двигатель переключают на полное напряжение сети.

Недостатком такого способа пуска двигателя в ход является резкое уменьшение пускового момента. Для уменьшения пускового тока в N раз необходимо приложенное напряжение понизить также в N раз. При этом пусковой момент, пропорциональный квадрату напряжения, уменьшится в N^2 раз. Таким образом, понижение напряжения допустимо при пуске двигателя без нагрузки или при малых нагрузках, когда пусковой момент может быть небольшим.

Часто двигатель пускают в ход посредством переключения обмотки статора со звезды на треугольник (рис. 105). В момент пуска обмотку статора соединяют звездой, а после того как двигатель разовьет частоту вращения, близкую к нормальной, ее переключают треугольником. При таком способе пуска двигателя в ход пусковой ток в сети уменьшается в три раза по сравнению с пусковым током, который потреблялся бы двигателем, если бы при пуске обмотка статора была соединена треугольником.

Этот способ пуска можно применять для двигателя, обмотка статора которого при питании от сети данного напряжения должна быть соединена треугольником.

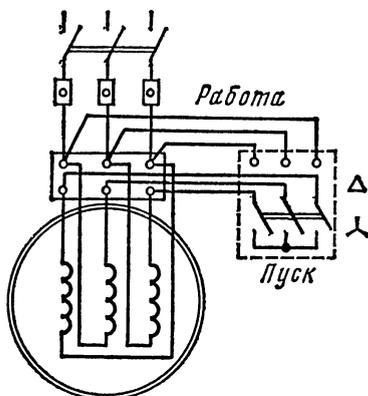


Рис. 105. Схема пуска короткозамкнутого асинхронного двигателя с переключением обмотки статора со звезды на треугольник

§ 83. Двигатели с улучшенными пусковыми свойствами

Простота конструкции и надежность в эксплуатации двигателей с короткозамкнутым ротором являются их существенным достоинством, благодаря чему они получили широкое применение в промышленности. Однако эти двигатели имеют плохие пусковые характеристики.

Значительное улучшение пусковых характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором достигается изменением кон-

струкции ротора: используют роторы с двойной короткозамкнутой обмоткой и с глубокими пазами.

Ротор с двойной короткозамкнутой обмоткой был впервые предложен М. О. Доливо-Добровольским в 1889 г. Он имеет две короткозамкнутые обмотки, выполненные в виде беличьих клеток (рис. 106, а).

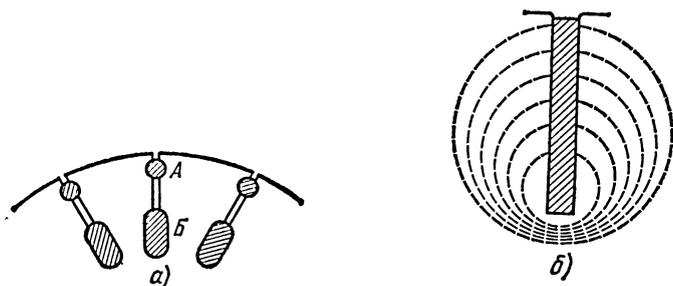


Рис. 106. Схема устройства ротора:
а — с двойной короткозамкнутой обмоткой, б — с глубокими пазами

Число пазов верхней *A* и нижней *B* клеток может быть одинаково или различно. Наружная обмотка *A* выполнена из стержней малого поперечного сечения, а внутренняя обмотка *B* — из стержней большого поперечного сечения. Поэтому активное сопротивление обмотки *A* оказывается значительно большим, чем активное сопротивление обмотки *B* ($R_A \gg R_B$). Вследствие того что стержни внутренней обмотки *B* глубоко погружены в тело ротора и окружены сталью, индуктивное сопротивление внутренней обмотки значительно больше, чем индуктивное сопротивление внешней обмотки ($X_B \gg X_A$).

Принцип действия этого двигателя состоит в следующем. В момент включения двигателя в сеть ротор неподвижен и частота тока в роторе равна частоте тока в сети $f_2 = f_1$. Ток в обмотках *A* и *B* распределяется обратно пропорционально их полным сопротивлениям.

Так как реактивные сопротивления обмоток асинхронных машин значительно больше их активных сопротивлений, то при пуске в ход распределение тока между обмотками *A* и *B* примерно обратно пропорционально их индуктивным сопротивлениям. Поэтому при пуске в ход ток в основном протекает по проводникам внешней обмотки *A*, имеющей меньшее индуктивное и большее активное сопротивление. Эта обмотка называется пусковой.

В рабочем режиме скольжение мало и, следовательно, частота тока в роторе также мала ($f_2 \approx 0$). Поэтому индуктивные сопротивления обмоток не имеют значения и токи в обмотках *A* и *B* обратно пропорциональны их активным сопротивлениям.

Таким образом, в рабочем режиме ток в основном проходит по проводникам внутренней обмотки *B*, имеющим меньшее активное сопротивление. Эта обмотка называется рабочей. При такой конструкции ротора увеличивается активное сопротивление его обмотки в момент пуска в ход двигателя, что уменьшает пусковой ток и увеличивает

пусковой момент так же, как включение пускового реостата в цепь фазного ротора.

В двигателях с глубокими пазами на роторе короткозамкнутая обмотка ротора выполняется в виде узких полос (рис. 106, б). При такой конструкции обмотки происходит оттеснение тока к верхней части проводников вследствие того, что нижние части проводников сцеплены с большим магнитным потоком рассеяния, чем верхние части.

Таким образом, ток, проходящий по проводникам, стремится сконцентрироваться преимущественно в верхней их части, что равносильно уменьшению поперечного сечения или увеличению активного сопротивления этих проводников.

Это явление оттеснения тока в верхние части проводников особенно сильно сказывается в момент включения двигателя, когда частота тока в роторе равна частоте тока сети n , следовательно, при пуске в ход повышается активное сопротивление обмотки ротора, что увеличивает пусковой момент. При увеличении частоты вращения ротора частота тока в его обмотке уменьшается и ток более равномерно распределяется по сечению стержней, и при нормальной частоте вращения неравномерность распределения тока по поперечному сечению стержней почти полностью исчезает.

Пусковой момент двигателей этого типа $M_n = (1 \div 1,5)M_n$, а пусковой ток $I_n = (4 \div 5)I_n$.

Таким образом, в двигателях с двойной короткозамкнутой обмоткой и с глубокими пазами пусковые моменты больше и пусковые токи меньше, чем у обычных короткозамкнутых двигателей.

Однако рабочие характеристики этих двигателей несколько хуже, чем обычных короткозамкнутых двигателей: несколько меньше $\cos \varphi$, КПД и максимальный момент, так как больше потоки рассеяния, т. е. больше индуктивные сопротивления обмоток ротора.

§ 84. Регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей

Частота вращения ротора в минуту определяется следующим выражением:

$$n_2 = n_1 (1 - S) = \frac{60f_1}{p} (1 - S).$$

Из этого выражения видно, что частоту вращения ротора можно регулировать изменением любой из трех величин, определяющих ее, т. е. изменением частоты тока сети f_1 , числа пар полюсов p и скольжения S .

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей изменением частоты тока сети сложно, так как необходим какой-либо регулирующий преобразователь частоты или генератор. Поэтому такой способ не имеет широкого применения.

Число полюсов машины может быть изменено, если на статоре имеется несколько (обычно две) обмоток с различным числом полюсов или одна обмотка, которую можно переключать на различное число

полюсов, или две обмотки, каждая из которых может переключаться на различное число полюсов.

На рис. 107, *а* схематически показаны две обмотки одной фазы, соединенные последовательно, которые могут быть переключены на четыре полюса.

Если изменить направление тока в одной из катушек, включив ее встречно с другой, то обмотка может переключаться на два полюса

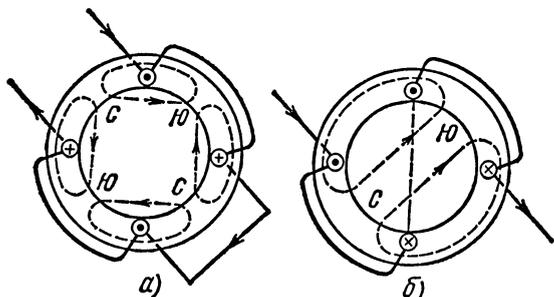


Рис. 107. Схема переключения обмотки статора на разное число полюсов:

а — четыре полюса, *б* — два полюса

(рис. 107, *б*). При изменении числа полюсов обмотки статора изменится частота вращения его магнитного поля, а следовательно, и частота вращения ротора двигателя. Этот способ регулирования частоты вращения асинхронного двигателя экономичен, но недостатком его является ступенчатое изменение частоты. Кроме того, стоимость такого

двигателя значительно возрастает вследствие усложнения обмотки статора и увеличения габаритов машин.

Регулирование частоты вращения изменением числа полюсов применяют в двигателях с короткозамкнутым ротором; в двигателях с фазным ротором этот способ не используется, так как приходится одновременно изменять число полюсов обмотки статора и число полюсов обмотки вращающегося ротора, что весьма сложно.

Заводы СССР выпускают двигатели с синхронными частотами вращения 500—750—1000—1500 об/мин. Такие двигатели имеют на статоре две обмотки, каждая из которых может быть переключена на различное число полюсов.

Скольжение можно изменять регулировочным реостатом, введенным в цепь обмотки ротора, а также регулированием напряжения сети.

При регулировании напряжения питающей сети изменяется вращающий момент двигателя пропорционально квадрату напряжения. При уменьшении вращающего момента уменьшится частота вращения ротора, т. е. увеличится скольжение.

Регулировочный реостат включается в цепь обмотки фазного ротора подобно пусковому реостату, но в отличие от пускового он рассчитывается на длительное прохождение тока.

При включении регулировочного реостата ток в роторе уменьшится, что вызовет снижение вращающего момента двигателя и, следовательно, уменьшение частоты вращения или увеличение скольжения. При увеличении скольжения увеличивается эдс и ток в роторе. Частота вращения или скольжение будет изменяться до восстановления равновесия моментов, т. е. пока ток в роторе не примет своего начального значения. Этот способ регулирования частоты вращения

может быть использован только в двигателях с фазным ротором, и несмотря на то что является неэкономичным (так как в регулировочном реостате происходит значительная потеря энергии), имеет широкое распространение.

§ 85. Однофазные асинхронные двигатели

Однофазные асинхронные двигатели широко применяют при небольших мощностях (до 1—2 кВт). Такой двигатель отличается от трехфазного тем, что на статоре его помещается однофазная обмотка. Ротор однофазного асинхронного двигателя имеет фазную или короткозамкнутую обмотку.

Особенностью однофазных асинхронных двигателей является отсутствие начального или пускового момента, т. е. при включении такого двигателя в сеть ротор его будет оставаться неподвижным.

Если же под действием какой-либо внешней силы вывести ротор из состояния покоя, то двигатель будет развивать вращающий момент.

Отсутствие начального момента является существенным недостатком однофазных асинхронных двигателей. Поэтому они всегда снабжаются пусковым устройством.

Наиболее простым пусковым устройством являются две обмотки, помещенные на статоре, сдвинутые одна относительно другой на половину полюсного деления (90° электрических). Эти обмотки катушек питаются от симметричной двухфазной сети, т. е. напряжения, приложенного к обмоткам катушек, равны между собой и сдвинуты на четверть периода по фазе. При таких напряжениях токи, проходящие по катушкам, также сдвинуты по фазе на четверть периода, что в дополнение к пространственному сдвигу катушек дает возможность получить вращающееся магнитное поле. При наличии вращающегося магнитного поля двигатель развивает пусковой момент.

В действительности двухфазная сеть обычно отсутствует, и пуск однофазного двигателя осуществляется включением двух катушек в одну общую для них однофазную сеть. Для получения угла сдвига фаз между токами в катушках, примерно равного $\pm \frac{\pi}{2}$ (четверти периода), одну из катушек (рабочую) включают в сеть непосредственно или с пусковым активным сопротивлением, а вторую катушку (пусковую) — через индуктивную катушку (рис. 108, а) или конденсатор (рис. 108, б).

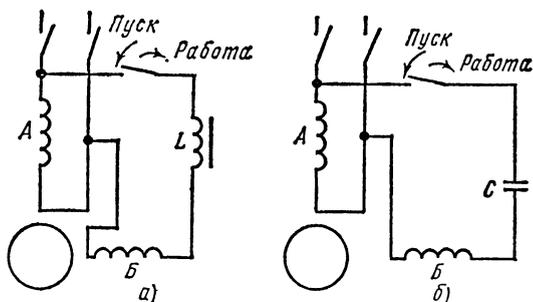


Рис. 108. Схема пуска однофазного двигателя при включении в цепь пусковой обмотки:
а — индуктивности, б — емкости

Пусковая обмотка включается только на период пуска в ход. В момент, когда ротор приобретает определенную частоту вращения, пусковая обмотка отключается от сети центробежным выключателем или специальным реле; двигатель работает как однофазный.

В качестве однофазного двигателя может быть использован любой трехфазный асинхронный двигатель. При работе трехфазного двигателя в качестве однофазного рабочая или главная обмотка, состоящая из двух последовательно соединенных фаз, включается непосредственно в однофазную сеть, третья фаза, являющаяся пусковой или вспомогательной обмоткой, включается в ту же сеть через пусковой элемент — сопротивление, индуктивность или конденсатор.

Конденсаторный (двухфазный) двигатель представляет собой однофазный асинхронный двигатель с двумя обмотками на статоре и короткозамкнутым ротором. Вспомогательная обмотка рассчитана на длительное прохождение тока и остается включенной не только при пуске в ход двигателя, но и при работе. При работе конденсаторного двигателя возникает вращающееся поле, наличие которого улучшает его рабочие свойства в сравнении с однофазными.

При увеличении емкости конденсатора возрастает и пусковой момент двигателя. Однако увеличение емкости батареи конденсаторов в рабочем режиме нежелательно, так как это ведет к снижению частоты вращения и КПД двигателя.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип действия асинхронного двигателя?
2. Как изменить направление вращения ротора?
3. Как устроен асинхронный двигатель с фазным и короткозамкнутым ротором?
4. От чего зависит вращающий момент асинхронного двигателя?
5. Если напряжение питающей сети понизится на 10%, то в какой мере уменьшится вращающий момент?
6. Объясните рабочие характеристики асинхронного двигателя.
7. Как осуществляется пуск в ход асинхронных двигателей?
8. Каково устройство двигателей с улучшенными пусковыми свойствами?

Глава IX

СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

§ 85. Принцип действия синхронного генератора

В синхронных машинах частота вращения ротора равна частоте вращения магнитного поля статора и, следовательно, определяется частотой тока сети и числом пар полюсов, т. е. $n = \frac{60f}{p}$ и $f = \frac{pn}{60}$.

Как и всякая электрическая машина, синхронная машина обратима, т. е. может работать как генератором, так и двигателем.

Электрическая энергия вырабатывается синхронными генераторами, первичными двигателями которых являются либо гидравлические, либо паровые турбины, либо двигатели внутреннего сгорания.

Обычно обмотки возбуждения получают энергию от возбудителя, который представляет собой генератор постоянного тока. Возбудитель находится на одном валу с рабочей машиной, и мощность его составляет малую величину, порядка 1—5% мощности синхронной машины, возбуждаемой им. При небольшой мощности часто используются схемы питания обмоток возбуждения синхронных машин от сети переменного тока через полупроводниковые выпрямители.

Простейшим генератором может быть виток из провода 1 и 2, вращающийся в магнитном поле (рис. 109). Магнитное поле возбуждается током обмотки возбуждения, помещенной на полюсах статора $N-S$.

При вращении витка проводники 1 и 2 пересекают магнитное поле, созданное между полюсами $N-S$, вследствие чего в витке будет индуцироваться эдс.

Концы витка соединены с кольцами 3, вращающимися вместе с витком. Если на кольцах поместить неподвижные щетки и соединить их с приемником электрической энергии, то по замкнутой цепи, состоящей из витка, колец, щеток и приемника энергии, пойдет электрический ток под действием эдс.

Полученная в таком простейшем генераторе эдс будет непрерывно изменяться в зависимости от положения витка в магнитном поле. Когда проводники 1 и 2 находятся под осями полюсов (см. рис. 109), то при вращении витка они пересекают в единицу времени наибольшее число линий магнитного поля. Следовательно, в данный момент индуцируемая в витке эдс будет иметь наибольшее значение.

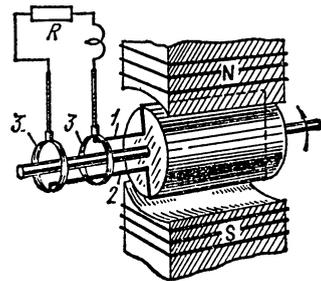


Рис. 109. Схема генератора переменного тока:
1 и 2 — проводники, 3 — кольца

В дальнейшем при повороте витка изменится число линий магнитного поля, пересекаемых в единицу времени проводниками 1 и 2. При повороте витка на 90° в пространстве проводники будут перемещаться в вертикальном направлении, совпадающем с направлением магнитных линий поля. Следовательно, проводники 1 и 2 не пересекают магнитных линий и эдс в витке равна нулю.

При повороте витка на угол, больший 90° , изменится направление перемещения этих проводников в магнитное поле, а следовательно, и направление эдс, индуцируемой в витке.

Если магнитное поле между полюсами N и S распределяется равномерно, то эдс будет меняться во времени синусоидально. За один оборот витка в пространстве эдс, индуцируемая в нем, претерпевает один период изменения.

Если виток вращается при помощи какого-либо первичного двигателя с постоянной частотой вращения n в минуту, то в этом витке индуцируется переменная эдс с частотой $f = \frac{n}{60}$.

§ 87. Устройство синхронного генератора

Возникновение эдс в проводниках возможно как при перемещении этих проводников в неподвижном магнитном поле, так и при перемещении магнитного поля относительно неподвижных проводников. В первом случае полюсы, т. е. индуцирующая часть машины, возбуждающая магнитное поле, помещаются на неподвижной части машины (на статоре), а индуцируемая часть (якорь), т. е. проводники, в которых создается эдс, — на вращающейся части машины (на роторе). Во втором случае полюсы помещаются на роторе, а якорь — на статоре.

Выше мы рассмотрели принцип действия синхронного генератора с неподвижными полюсами и вращающимся якорем. В таком генераторе энергия, вырабатываемая им, передается приемнику энергии посредством скользящих контактов — контактных колец и щеток.

Скользящий контакт в цепи большой мощности создает значительные потери энергии, а при высоких напряжениях наличие такого контакта крайне нежелательно. Поэтому генераторы с вращающимся якорем и неподвижными полюсами выполняют только при невысоких напряжениях (до 380/220 В) и небольших мощностях (до 15 кВ·А).

Наиболее широкое применение получили синхронные генераторы, в которых полюсы помещены на роторе, а якорь — на статоре.

Ток возбуждения протекает по обмотке возбуждения, которая представляет собой последовательно соединенные катушки, помещенные на полюсы ротора.

Концы обмотки возбуждения соединены с контактными кольцами, которые крепятся на валу машины. На кольцах помещаются неподвижные щетки, посредством которых в обмотку возбуждения подводится постоянный ток от постороннего источника энергии — генератора постоянного тока, называемого возбудителем.

На рис. 110 показан общий вид синхронного генератора с возбудителем. Устройство статора синхронного генератора аналогично устройству статора асинхронной машины.

Ротор синхронных генераторов выполняют либо с явно выраженными (выступающими) полюсами, либо с неявно выраженными полюсами, т. е. без выступающих полюсов.

В машинах с относительно малой частотой вращения (при большом

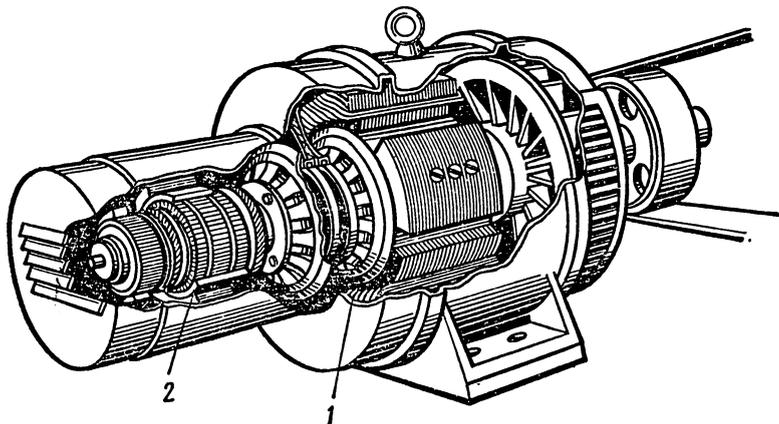


Рис. 110. Устройство синхронного генератора:
1 — синхронный генератор; 2 — возбудитель

числе полюсов) роторы должны быть с явно выраженными полюсами (рис. 111, а), равномерно расположенными по окружности ротора.

Полюс состоит из сердечника 1, полюсного наконечника 2 и катушки обмотки возбуждения 3, помещаемой на сердечнике полюса.

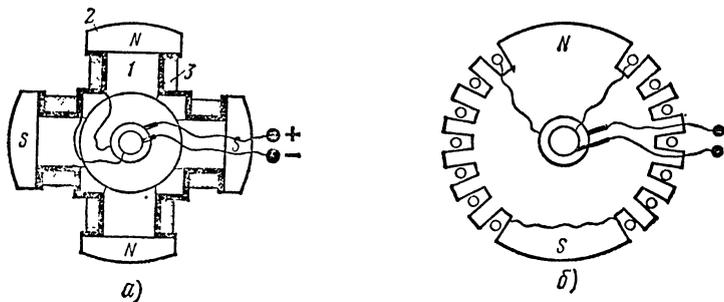


Рис. 111. Ротор синхронной машины:
а — с явно выраженными полюсами, б — с неявно выраженными полюсами;
1 — сердечник, 2 — полюсный наконечник, 3 — катушка обмотки возбуждения

Первичные двигатели синхронных генераторов с явно выраженными полюсами обычно представляют собой гидравлические турбины, являющиеся тихоходными машинами.

При большой частоте вращения такое устройство ротора не может обеспечить нужной механической прочности и поэтому у высокоско-

ростных машин роторы выполняют с неявно выраженными полюсами (рис. 111, б).

Сердечники роторов с неявно выраженными полюсами обычно изготовляют из цельных поковок, на поверхности которых фрезеруются пазы. После укладки обмоток возбуждения на роторе пазы его забиваются клиньями, а лобовые соединения обмотки возбуждения укрепляются стальными бандажами, помещенными на торцовых частях ротора. При такой конструкции ротора допускаются большие частоты вращения.

Для генераторов с неявно выраженными полюсами первичными двигателями обычно являются паровые турбины, принадлежащие к числу быстроходных машин.

§ 88. Работа синхронного генератора под нагрузкой

Если синхронный генератор не нагружен, т. е. работает вхолостую, то тока в обмотках статора нет. Магнитный поток полюсов, созданный током возбуждения, индуцирует в трехфазной обмотке статора эдс.

При нагрузке генератора по обмотке статора протекает ток. При симметричной нагрузке токи в фазах обмотки статора равны и сдвинуты на $\frac{1}{3}$ периода. Токи статора создают вращающееся магнитное поле, частота вращения которого $n_1 = \frac{60f}{p} = n$, т. е. магнитное поле, созданное токами в обмотке статора, вращается синхронно с магнитным полем полюсов.

В обмотке статора синхронного генератора создается эдс, величина которой зависит от магнитного потока полюсов. Если магнитный поток полюсов очень мал, то и эдс также мала. При увеличении магнитного потока возрастает и эдс машины. Таким образом, при постоянной частоте вращения ротора эдс пропорциональна магнитному потоку, который возбуждается постоянным током, протекающим по проводникам обмотки возбуждения. Если повысить ток в обмотке возбуждения, то возрастет и магнитный поток полюсов, что вызовет увеличение эдс машины. Следовательно, изменение тока в обмотке возбуждения вызывает соответствующее изменение эдс машины и позволяет регулировать напряжение на зажимах генератора.

При холостом ходе синхронного генератора напряжение равно эдс, индуцированной в обмотке статора. При нагрузке генератора напряжение не равно эдс, так как в сопротивлении (активном и реактивном) обмотки статора возникает падение напряжения. Кроме того, токи, проходящие по обмоткам статора, создают поток реакции якоря, который воздействует на поток полюсов, так что при нагрузке магнитный поток не будет равен магнитному потоку полюсов при холостой работе генератора. Поэтому изменение нагрузки, т. е. тока в статоре генератора, будет вызывать изменение напряжения на зажимах генератора в случае, если ток в обмотке возбуждения остается неизменным.

На рис. 112, а изображены внешние характеристики синхронного генератора при активной и реактивной нагрузках. Эти характеристики

показывают зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при неизменных частоте вращения ротора и токе возбуждения. Различный вид этих характеристик при активной, индуктивной и емкостной нагрузках объясняется неодинаковым воздействием поля реакции якоря на магнитный поток полюсов.

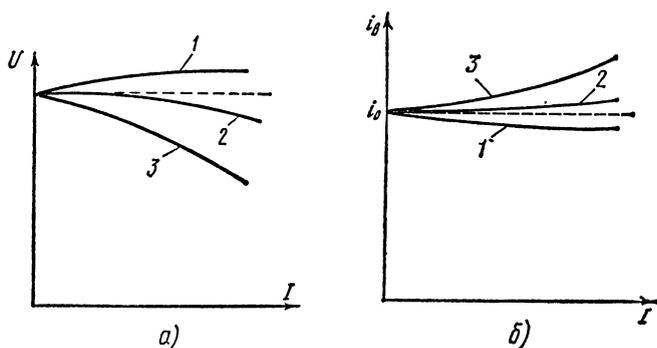


Рис. 112. Характеристики синхронного генератора:

a — внешние, *б* — регулировочные, 1 — емкостная, 2 — активная, 3 — индуктивная

Для нормальной работы любого приемника электрической энергии требуется постоянное напряжение сети. Чтобы обеспечить постоянное напряжение сети при изменении нагрузки в синхронном генераторе, изменяют и ток возбуждения.

Зависимость, показывающая, каким образом необходимо изменить ток в обмотке возбуждения для того, чтобы при изменении нагрузки генератора напряжение на его зажимах оставалось неизменным, называется регулировочной характеристикой (рис. 112, б). При активной нагрузке увеличение тока в статоре вызывает незначительное понижение напряжения, так как реакция якоря уменьшает магнитный поток в малой степени. При этой нагрузке требуется незначительно увеличить ток возбуждения для обеспечения постоянства напряжения. При индуктивной нагрузке создается размагничивающее поле реакции якоря, уменьшающее поток полюсов. Поэтому, для постоянства напряжения (т. е. для постоянства результирующего магнитного потока) необходимо в большей мере увеличить ток возбуждения для компенсации размагничивающего поля реакции якоря. При емкостной нагрузке происходит усиление магнитного поля и для постоянства напряжения следует уменьшить ток возбуждения при увеличении тока в статоре.

Наиболее часто синхронные генераторы работают на общую мощную сеть электростанции или энергосистемы. Напряжение такой сети U_c и частота тока в ней неизменны. ЭДС генератора e_r равна и противоположна напряжению сети $e_r = -u_c$.

Результирующее магнитное поле Φ_p статора, вращающееся с частотой $n_1 = \frac{60f}{p}$ в пространстве, опережает напряжение E_r на 90° (рис. 113).

При неизменном напряжении сети U_c амплитуда магнитного потока Φ_p результирующего магнитного поля статора также неизменна.

При активной нагрузке генератора ток статора I совпадает по фазе с напряжением U_r . Поток реакции якоря Φ_a совпадает по фазе с током I , так что вектор тока в статоре I в другом масштабе определит вектор Φ_a . Результирующий магнитный поток создается действием потока полюсов Φ_m и потока реакции якоря Φ_a и может быть представлен геометрической суммой этих магнитных потоков.

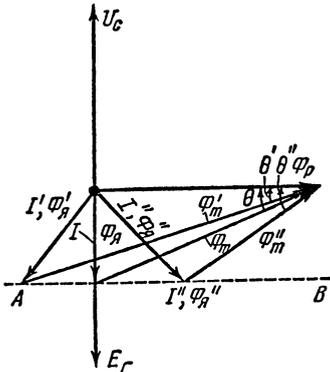


Рис. 113. Векторная диаграмма синхронного генератора при различных токах возбуждения

Изменение тока возбуждения генератора не вызывает изменения его активной мощности, так как мощность, потребляемая им от первичного двигателя, остается неизменной (вращающий момент первичного двигателя и частота вращения постоянны). Поэтому активная

составляющая тока статора постоянна и конец вектора I (Φ_a) находится на прямой AB , параллельной горизонтальной оси. Если увеличить ток возбуждения, то возрастет поток полюсов Φ'_m , вектор которого находится между прямой AB и концом неизменного вектора Φ_p .

В этом случае изменится как по величине, так и по направлению вектор I' и Φ_a' , т. е. ток окажется отстающим по фазе от напряжения генератора.

При уменьшении тока возбуждения уменьшится также и поток полюсов Φ''_m , что приведет к изменению тока в статоре I'' (Φ_a'') как по величине, так и по фазе. Таким образом, изменение тока возбуждения генератора, работающего на мощную сеть, вызывает изменение реактивной составляющей тока в статоре, т. е. изменяет реактивную мощность, вырабатываемую генератором.

Для изменения активной мощности необходимо изменить вращающий момент первичного двигателя, приводящего во вращение ротор синхронного генератора. Под действием вращающего момента первичного двигателя M_1 ротор машины с помещенными на нем полюсами приводится во вращение с частотой вращения в минуту n . Результирующее поле статора вращается в том же направлении с частотой $n_1 = n$ (рис. 114, а). Следовательно, поле полюсов Φ_m и результирующее поле статора Φ_p вращаются синхронно, оставаясь неподвижными друг относительно друга, и между этими полями устанавливается взаимодействие. В результате создается электромагнитный тормозной момент M_a , уравновешивающий момент первичного двигателя.

При равновесии моментов $M_1 = M_a$ угол между осями магнитных полей θ остается неизменным.

Если увеличить момент первичного двигателя M'_1 (рис. 114, б), то он окажется больше тормозного, и ротор, получив некоторое уско-

рение, начнет перемещаться относительно поля статора, вращающегося с постоянной частотой $n_1 = \frac{60f}{p}$ (частота тока сети f постоянна). При этом угол между осями магнитных полей ротора и статора θ_1 возрастет, увеличивая тормозной электромагнитный момент M'_2 так, что вновь восстановится равновесие моментов, т. е. $M'_1 = M'_2$.

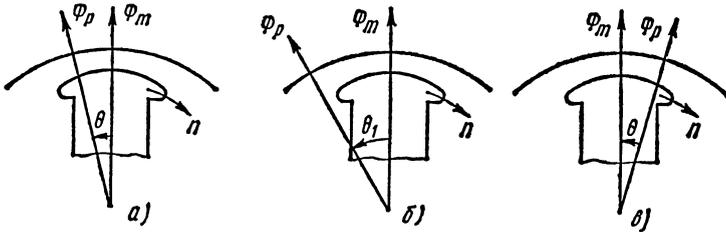


Рис. 114. Угол между осями магнитных полей ротора и статора при меньшем (а), большем (б) моментах первичного двигателя и при работе синхронной машины двигателем (в)

Для включения генератора в сеть необходимо:
 одинаковое чередование фаз в сети и генераторе;
 равенство напряжения сети и эдс генератора;
 равенство частот эдс генератора и напряжения сети;
 включать генератор в тот момент, когда эдс генератора в каждой фазе направлена встречно напряжению сети.

Невыполнение этих условий ведет к тому, что в момент включения генератора в сеть возникают токи, которые могут оказаться большими и вывести из строя генератор.

При включении генераторов в сеть используют специальные устройства — синхроскопы. Простейшим синхроскопом являются три лампы накаливания, включаемые между зажимами генератора и сети. Лампы должны быть рассчитаны на двойное напряжение сети и до включения генератора будут одновременно загораться и погасать.

В момент, когда эдс генератора равна и направлена встречно напряжению сети, лампы погаснут, так как напряжение на каждой лампе равно нулю. При погасании ламп генератор включается в сеть. До включения генератора в сеть эдс его измеряется вольтметром и регулированием тока возбуждения устанавливают ее, равной напряжению сети. Частота эдс генератора регулируется изменением частоты вращения первичного двигателя.

§ 89. Синхронные двигатели

Синхронный двигатель не имеет принципиальных конструктивных отличий от синхронного генератора. Так же как и в генераторе, на статоре синхронного двигателя помещается трехфазная обмотка, при включении которой в сеть трехфазного переменного тока будет соз-

дано вращающееся магнитное поле Φ_p , частота вращения в минуту которого $n_1 = \frac{60f}{p}$.

На роторе двигателя помещена обмотка возбуждения, включаемая в сеть источника постоянного тока. Ток возбуждения создает магнитный поток полюсов Φ_m . Вращающееся магнитное поле, полученное токами обмотки статора, увлекает за собой полюсы ротора (рис. 114, в). При этом ротор может вращаться только синхронно с полем, т. е. с частотой, равной частоте вращения поля статора. Таким образом, частота вращения синхронного двигателя строго постоянна, если неизменна частота тока питающей сети.

Основным достоинством синхронных двигателей является возможность их работы с потреблением опережающего тока, т. е. двигатель может представлять собой емкостную нагрузку для сети. Такой двигатель повышает $\cos \varphi$ всего предприятия, компенсируя реактивную мощность других приемников энергии.

Так же как и в генераторах, в синхронных двигателях изменение реактивной мощности, т. е. изменение $\cos \varphi$, достигается регулированием тока возбуждения. При некотором токе возбуждения, соответствующем нормальному возбуждению, $\cos \varphi = 1$. Уменьшение тока возбуждения вызывает появление отстающего (индуктивного) тока в статоре, а при увеличении тока возбуждения (перевозбужденный двигатель) — опережающего (емкостного) тока в статоре.

Достоинством синхронных двигателей является также меньшая, чем у асинхронных, чувствительность к изменению напряжения питающей сети. У синхронных двигателей вращающий момент пропорционален напряжению сети в первой степени, тогда как у асинхронных — квадрату напряжения.

Вращающий момент синхронного двигателя создается в результате взаимодействия магнитного поля статора с магнитным полем полюсов. От напряжения питающей сети зависит только магнитный поток поля статора.

Синхронные двигатели выполняют преимущественно с явно выраженными полюсами, и работают они в нормальном режиме с опережающим током при $\cos \varphi = 0,8$. Возбуждение синхронные двигатели получают либо от возбудителя, либо от сети переменного тока через полупроводниковые выпрямители.

Пуск в ход синхронного двигателя непосредственным включением его в сеть невозможен, так как при включении обмотки статора в сеть создается вращающееся магнитное поле, а ротор в момент включения неподвижен. Поэтому для пуска в ход двигателя необходимо предварительно довести частоту вращения ротора до синхронной частоты или близкой к ней.

В настоящее время исключительное применение имеет так называемый асинхронный пуск синхронных двигателей, сущность которого заключается в следующем. В полюсных наконечниках ротора синхронного двигателя уложена пусковая обмотка, выполненная в виде беличьего колеса, наподобие короткозамкнутой обмотки ротора асинхронной машины.

Обмотка статора двигателя включается в трехфазную сеть, и пуск его производится так же, как и пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

После того как двигатель разовьет частоту, близкую к синхронной (примерно 95%), обмотка возбуждения включается в сеть постоянного тока и двигатель входит в синхронизм, т. е. частота ротора увеличивается до синхронной.

При пуске в ход двигателя обмотка возбуждения замыкается на сопротивление, примерно в 10—12 раз большее сопротивления самой обмотки. Нельзя обмотку возбуждения при пуске в ход оставить разомкнутой или замкнуть накоротко. Если при пуске в ход обмотка возбуждения окажется разомкнутой, то в ней будет индуцироваться очень большая эдс, опасная как для изоляции обмотки, так и для обслуживающего персонала. Создание эдс большой величины объясняется тем, что при пуске в ход поле статора вращается с большой частотой относительно неподвижного ротора и с большой частотой пересекает проводники обмотки возбуждения, имеющей большое число витков.

Работа синхронной машины с потреблением из сети опережающего тока дает возможность использовать ее в качестве компенсатора.

Компенсатором является синхронный двигатель, работающий без нагрузки и предназначенный для повышения $\cos \varphi$ предприятия.

Конструктивно компенсатор отличается от синхронного двигателя незначительно. Компенсатор не несет механической нагрузки, поэтому его вал и ротор легче, а воздушный зазор меньше, чем у двигателя.

Основным недостатком синхронных двигателей является потребность в источнике как переменного, так и постоянного тока.

Потребность в источнике постоянного тока для питания обмотки возбуждения синхронного двигателя делает его крайне неэкономичным при небольших мощностях. Поэтому при малых мощностях синхронные двигатели с возбуждением постоянным током не находят применения.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип работы синхронного генератора?
2. Каково устройство генератора с явно и неявно выраженными полюсами?
3. Объясните внешние и регулировочные характеристики синхронного генератора.
4. Какие условия необходимо выполнить для включения синхронного генератора в сеть?
5. Каков принцип работы синхронного двигателя?

Глава X МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 90. Принцип действия и устройство генератора постоянного тока

Простейшим генератором является виток, вращающийся в магнитном поле полюсов N и S (см. рис. 109). В таком витке индуцируется переменная во времени эдс. Поэтому при соединении концов витка с контактными кольцами, вращающимися вместе с витком, в нагрузке

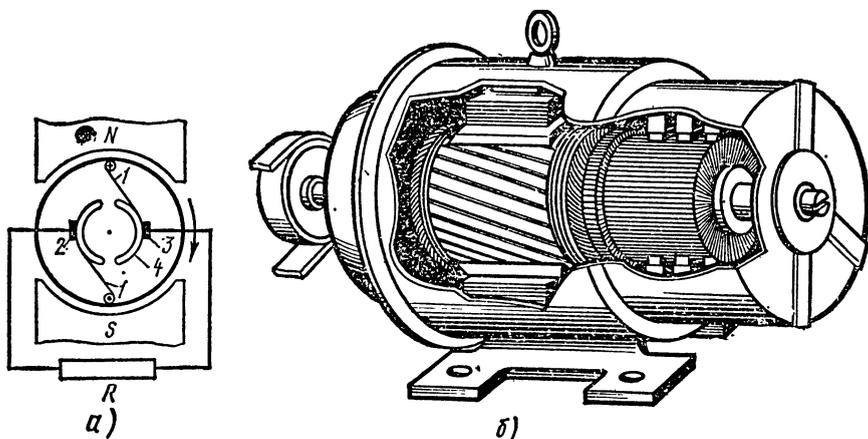


Рис. 115. Генератор постоянного тока:

a — схема устройства, b — общий вид; 1 — виток, 2 и 3 — щетки, 4 — коллекторные пластины

через неподвижные щетки протекает переменный ток, т. е. такая машина является генератором переменного тока.

Для преобразования переменного тока в постоянный применяют коллектор, принцип действия которого состоит в следующем. Концы витка 1 (рис. 115) присоединены к двум медным полукольцам (сегментам), называемым коллекторными пластинами. Пластины жестко укреплены на валу машины и изолированы как друг от друга, так и от вала. На пластинах помещены неподвижные щетки 2 и 3, электрически соединенные с приемником энергии.

При вращении витка коллекторные пластины также вращаются вместе с валом машины и каждая из неподвижных щеток 2 и 3 соприкасается то с одной, то с другой пластиной. Щетки на коллекторе установлены так, чтобы они переходили с одной пластины на другую в тот момент, когда эдс, индуцируемая в витке, была равна нулю. В этом случае при вращении якоря в витке индуцируется переменная эдс, изменяющаяся синусоидально при равномерном распределении

магнитного поля, но каждая из щеток соприкасается с той коллекторной пластиной и соответственно с тем из проводников, который в данный момент находится под полюсом определенной полярности.

Следовательно, эдс на щетках 2 и 3 знака не меняет, и ток по внешнему участку замкнутой электрической цепи проходит в одном направлении от щетки 2 через сопротивление R к щетке 3. Однако несмотря на неизменность направления эдс во внешней цепи величина ее меняется во времени, т. е. получена не постоянная, а пульсирующая эдс. Ток во внешней цепи будет также пульсирующим.

Если поместить на якоре два витка под углом 90° один к другому и концы этих витков соединить с четырьмя коллекторными пластинами, то пульсация эдс и тока во внешней цепи значительно уменьшится. При увеличении числа коллекторных пластин пульсация быстро уменьшается и при большом числе коллекторных пластин эдс и ток практически постоянны.

На рис. 115, б показан общий вид машины постоянного тока.

Неподвижная часть является индуктирующей, т. е. создающей магнитное поле, а вращающаяся часть — индуктируемой (якорем).

Неподвижная часть машины (рис. 116, а) состоит из главных полюсов 1, дополнительных полюсов 2 и станины 3. Главный полюс (рис. 116, б) представляет собой электромагнит, создающий магнитный поток. Он состоит из сердечника 4, обмотки возбуждения 6 и полюсного наконечника 7. Полюсы крепятся на станине 3 с помощью болта 5. Сердечник полюса отливается из стали и имеет поперечное сечение овальной формы. На сердечнике полюса помещена катушка обмотки возбуждения, намотанная из изолированного медного провода. Катушки всех полюсов соединяются последовательно, образуя обмотку возбуждения. Ток, проходящий по обмотке возбуждения, создает магнитный поток. Полюсный наконечник удерживает обмотку возбуждения на полюсе и обеспечивает равномерное распределение магнитного поля под полюсом. Полюсному наконечнику придают такую форму, при которой воздушный зазор между полюсами и якорем одинаков по всей длине полюсной дуги.

Добавочные полюсы имеют также сердечник и обмотку. Добавочные полюсы расположены между главными полюсами, и число их может быть либо равным числу главных полюсов, либо вдвое меньшим. Добавочные полюсы устанавливаются в машинах больших мощностей;

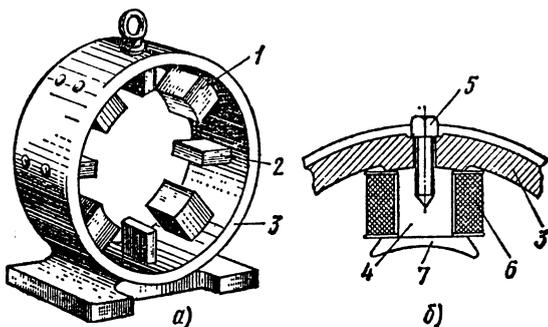


Рис. 116. Устройство статора машины постоянного тока:

а — схема статора, б — схема главного полюса; 1 — главные полюсы, 2 — дополнительные полюсы, 3 — станина, 4 — сердечник, 5 — болт, 6 — обмотка возбуждения, 7 — полюсный наконечник

они служат для устранения искрения под щетками. В машинах малых мощностей добавочных полюсов обычно нет.

Станину отливают из стали; она является остовом машины. На станине крепят главные и добавочные полюсы, а также на торцовых

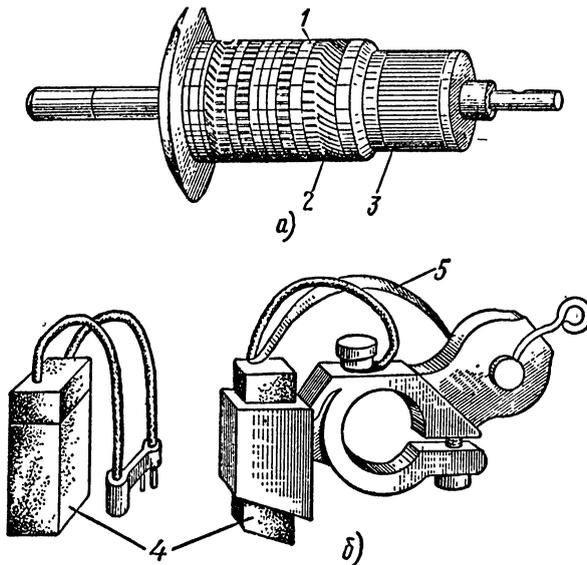


Рис. 117. Якорь машины постоянного тока:

a — общий вид, *b* — щетка и щеткодержатель; 1 — сердечник, 2 — обмотка, 3 — коллектор, 4 — щетка, 5 — пружина

сторонах ее — боковые щиты с подшипниками, удерживающими вал машины.

Вращающаяся часть машины (якорь) (рис. 117, *a*) состоит из сердечника 1, обмотки 2 и коллектора 3. Сердечник якоря представляет собой цилиндр, собранный из листов электротехнической стали. Листы изолируются друг от друга лаком или бумагой для уменьшения потерь на вихревые токи. Стальные листы штампуют на станках по шаблону; они имеют пазы, в которых укладываются проводники обмотки якоря. В теле якоря делают воздушные каналы для охлаждения обмотки и его сердечника. Обмотка тщательно изолируется от сердечника и закрепляется в пазах деревянными клиньями. Лобовые соединения укрепляются стальными бандажами. Все секции обмотки, помещенные на якоре, включаютя между собой последовательно, образуя замкнутую цепь, и присоединяются к коллекторным пластинам.

Коллектор представляет собой цилиндр, состоящий из отдельных пластин. Коллекторные пластины изготовляют из твердотянутой меди и изолируют между собой и от корпуса прокладками из миканита. Для крепления на втулке коллекторным пластинам придают форму «ласточкина хвоста», который зажимается между выступом на втулке и шайбой, имеющими форму, соответствующую форме пластины. Шайба крепится к втулке болтами.

Коллектор является наиболее сложной в конструктивном отношении и наиболее ответственной в работе частью машины. Поверхность коллектора должна быть строго цилиндрической во избежание биения и искрения щеток.

Для соединения обмотки якоря с внешней цепью на коллекторе помещают неподвижные щетки, которые могут быть графитными, угольно-графитными или бронзо-графитными. В машинах высокого напряжения применяют графитные щетки, имеющие большое переходное сопротивление между щеткой и коллектором, в машинах низкого напряжения — бронзо-графитные щетки. Щетки помещают в особых щеткодержателях (рис. 117, б). Щетка 4, помещенная в обойме щеткодержателя, прижимается пружиной 5 к коллектору. На каждом щеткодержателе может находиться несколько щеток, включенных параллельно.

Щеткодержатели помещаются на щеточных болтах-пальцах, которые, в свою очередь, закреплены на траверсе.

Щеточные пальцы изолируются от траверсы изоляционными шайбами и втулками. Число щеткодержателей обычно равно числу полюсов.

Траверса устанавливается на подшипниковом щите в машинах малой и средней мощности или прикрепляется к станине в машинах большой мощности. Траверсу можно поворачивать и этим изменять положение щеток относительно полюсов.

Обычно траверса находится в таком положении, при котором расположение щеток в пространстве совпадает с расположением осей главных полюсов.

§ 91. Обмотки якорей и эдс машины постоянного тока

Обмотки якорей машины постоянного тока изготовляют из изолированных медных проводов, а в машинах больших мощностей — из шин прямоугольного поперечного сечения; обмотки выполняются замкнутыми. При изготовлении обмотки из шин прямоугольного поперечного сечения (стержней) каждая секция может состоять из двух активных проводов (одновитковая секция). Из изолированного медного провода секции обмоток изготовляют в виде катушек с определенным числом витков (многовитковые секции).

В машинах постоянного тока наиболее широкое применение находят двухслойные обмотки, у которых в пазах якоря активные части секций размещаются в два слоя.

Каждая секция обмотки состоит из двух активных сторон, отстоящих друг от друга на расстоянии, близком к полюсному делению τ , т. е. расстоянию между осями соседних разноименных полюсов. При таком расстоянии между активными проводниками (шаге обмотки)

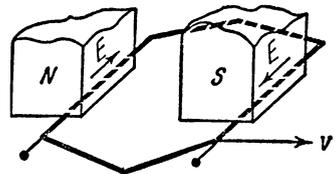


Рис. 118. Направление эдс в активных сторонах секции обмотки

эдс, индуктированные в этих проводниках, будут направлены в одну сторону и эдс секции будет иметь наибольшее значение, так как эдс ее активных сторон складываются (рис. 118). Одна активная часть секции находится в верхнем слое паза, другая — в нижнем. При изображении развернутых схем обмоток активные стороны, лежащие в верхнем слое паза, изображаются сплошной линией, а стороны нижнего слоя — прерывистой. Концы секции соединяются как с другими секциями обмотки, так и с коллекторными пластинами.

Секции, образующие обмотки, соединяются между собой так, чтобы индуктированные в них эдс были направлены согласно, т. е. в одну сторону. Для этого начальные (конечные) проводники последовательно соединенных секций должны находиться в любой момент под полюсами одинаковой полярности.

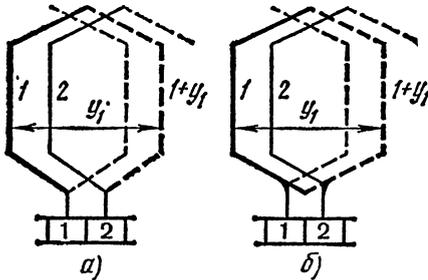


Рис. 119. Секция простой параллельной обмотки:

a — одновитковой, *b* — многовитковой

В зависимости от порядка соединения секций друг с другом обмотки могут быть параллельными (петлевыми) и последовательными (волновыми).

На рис. 119 показана (толстой линией) одновитковая (*a*) и многовитковая (*b*) секции параллельной обмотки, состоящие из активной части верхнего слоя паза *1* и нижнего слоя паза *1+y₁*. В этих обмотках последовательно соединяются между собой секции начальные (конечные), активные стороны которых находятся под одним полюсом в расположенных рядом пазках. Таким образом, концы секции параллельной обмотки присоединяются к двум соседним коллекторным пластинам (*1'* и *2'*), причем в многовитковых секциях к пластине *1'* подключается начало первого витка, а к пластине *2'* — конец последнего витка, соединяемый с началом следующей секции. Любая коллекторная пластина (например, *1'*) соединяется с двумя активными проводниками, в каждом из которых проходит ток одной параллельной ветви обмотки *i_a*, так что между двумя щетками различной полярности обмотка образует две параллельные ветви.

При параллельных обмотках число щеток должно быть всегда равно числу полюсов $2p$ и, следовательно, число параллельных ветвей $2a$ в этих обмотках равно числу полюсов, т. е. $2a=2p$ ($a=p$).

При большом числе полюсов параллельная обмотка образует много параллельных ветвей, что дает возможность понизить ток в одной ветви и уменьшает поперечное сечение провода обмотки.

В последовательных обмотках начальные (конечные) активные провода секций находятся под различными полюсами одинаковой полярности (рис. 120).

Активные стороны первой секции находятся под полюсами N_1 и S_1 . Активные стороны второй секции, последовательно соединенной с первой, находятся под полюсами N_2-S_2 , третьей секции — под

полюсами N_3 и S_3 и т. д. После включения всех секций по окружности якоря соединяется верхний проводник пары $n-1$, лежащей рядом (обычно слева) с проводником пары n , от которого начали обход обмотки. Последовательно с верхним проводником пары $n-1$ включаем проводники, лежащие под полюсами S_1, N_2, S_2 и т. д., по окружности якоря, и заканчиваем проводником, лежащим рядом с проводником $n-1$. Затем вновь соединяем пары проводников, находящиеся под различными полюсами по окружности якоря и т. д., пока все проводники не окажутся включенными в замкнутую цепь.

Вне зависимости от числа полюсов простая последовательная обмотка образует две параллельные ветви, т. е. $2a = 2$. Поэтому при любом числе полюсов машина может иметь только две щетки, если обмотка якоря последовательная, причем эти щетки должны помещаться на расстоянии $\frac{1}{2}p$ части окружности коллектора. Например, при $p=2$ расстояние между щетками должно быть равно четверти окружности коллектора. Это дает возможность делать доступной для осмотра не всю окружность коллектора, а только ее часть.

Наличие только двух параллельных ветвей свидетельствует о том, что в каждой ветви последовательно соединяется большое число активных проводов и эдс машины может иметь большое значение. Поэтому последовательные обмотки находят применение для машин высокого напряжения.

В проводнике, перемещающемся в магнитном поле в направлении, перпендикулярном направлению магнитных линий этого поля, создается эдс, равная $\epsilon = Blv$, где B — среднее значение магнитной индукции, Т; l — длина проводника, м; v — скорость перемещения проводника, м/с.

На якоре машины укладывается большое число активных проводников, которое обозначим буквой N . В каждой параллельной ветви обмотки будет последовательно включено $N/2a$ активных проводника. Таким образом, эдс машины $E = N/2a \cdot \epsilon = N/2a Blv$.

Скорость перемещения проводников в магнитном поле $v = 2p\tau \frac{n}{60}$, где $2p$ — число полюсов машины; τ — полюсное деление; т. е. расстояние между осями разноименных полюсов; n — частота вращения якоря машины в минуту.

Имея в виду, что произведение среднего значения магнитной индукции B на осевую длину полюса l и на полюсное деление τ представляет собой магнитный поток одного полюса $\Phi = Bl\tau$, получим для

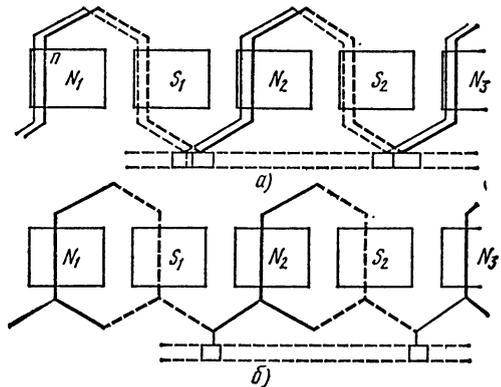


Рис. 120. Развернутая схема двух секций простой последовательной обмотки:
а — однополюсовой, б — многополюсовой

эдс машины следующее выражение:

$$E = \frac{pN}{60a} n\Phi.$$

Для каждой машины величины p , N и a постоянны, так что отношение $\frac{pN}{60a} = C$ представляет собой величину, постоянную для данной машины. Следовательно, эдс машины постоянного тока определяется следующим выражением: $E = Cn\Phi$, т. е. эдс машины постоянного тока равна произведению постоянной конструктивной величины C на частоту вращения якоря в минуту n и магнитный поток полюсов Φ . Это выражение показывает, что для изменения эдс (или напряжения) машины необходимо изменить либо частоту вращения якоря, либо магнитный поток полюсов. Так как изменение частоты вращения двигателя, приводящего в движение генератор, связано со значительными сложностями, то на практике регулировку эдс и напряжения производят изменением магнитного потока, который зависит от тока в обмотке возбуждения. В цепь обмотки возбуждения включают реостат для изменения тока возбуждения.

§ 92. Магнитное поле машины постоянного тока при нагрузке

При холостом ходе машины тока в якоре нет и магнитное поле создается намагничивающей силой полюсов. Оно симметрично относительно оси полюсов и распределяется равномерно в воздушном зазоре

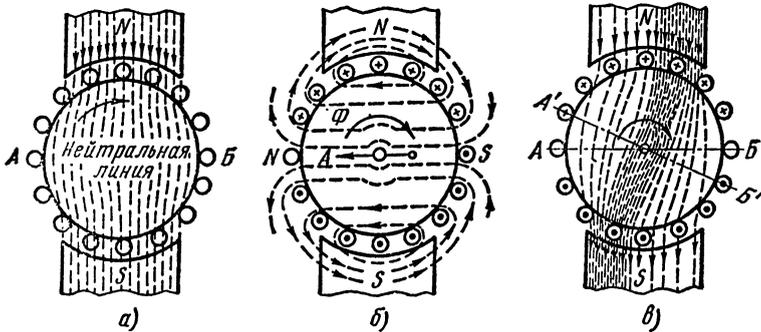


Рис. 121. Магнитное поле машины постоянного тока:

a — магнитное поле полюсов, b — магнитное поле якоря, v — результирующее магнитное поле при нагрузке

(рис. 121, a). Положим, что щетки установлены на геометрической нейтральной, т. е. на линии, проходящей через центр якоря и перпендикулярной оси полюсов.

При нагрузке машины в обмотке якоря протекает ток, который создает свое магнитное поле, которое, воздействуя на магнитное поле полюсов, изменяет и искажает его, т. е. по магнитной цепи замкнется результирующий магнитный поток Φ_p под действием намагничивающих сил полюсов и якоря.

Результирующий магнитный поток Φ_p не равен потоку полюсов Φ_m при холостом ходе. Воздействие поля, созданного током в якоре при нагрузке машины, на магнитное поле полюсов называется реакцией якоря.

Если по проводникам обмотки якоря невозбужденной машины пропустить от постороннего источника такой ток, который протекал бы при нагрузке машины, то будет создано магнитное поле якоря (рис. 121, б). Это поле якоря замкнется в направлении, перпендикулярном оси полюсов, и называется поперечным полем реакции якоря.

Магнитодвижущая сила якоря под одним краем полюса (под набегающим для генератора и под сбегающим для двигателя) направлена встречно магнитодвижущей силе полюсов, а под другим краем полюса (под сбегающим для генератора и под набегающим для двигателя) согласно магнитодвижущей силе полюсов. Следовательно, под одним краем полюса происходит уменьшение, а под другим — увеличение магнитной индукции.

Таким образом, при нагрузке машины результирующее магнитное поле будет несимметрично относительно оси полюсов (рис. 121, в), т. е. поперечное поле реакции якоря перераспределяет магнитное поле полюсов, ослабляя его под одним краем и усиливая под другим. Поле реакции якоря также смещает физическую нейтраль, т. е. линию, проходящую через центр якоря и перпендикулярную мдс результирующего магнитного поля.

§ 93. Коммутация тока

Под коммутацией понимают переключение секции из одной ветви обмотки в другую и происходящее при этом изменение направления тока в ней.

При вращении якоря машины коллекторные пластины поочередно соприкасаются со щетками, так что в определенные промежутки времени секция или несколько секций замыкаются щеткой. Поскольку переходное сопротивление между щеткой и коллекторной пластиной сравнительно мало, то замыкание секций близко к их короткому замыканию.

На рис. 122, а показана коммутируемая секция простой параллельной обмотки. В этой секции протекает ток одной параллельной ветви: $i_{\text{я}} = I/2a$, где I — ток нагрузки; $2a$ — число параллельных ветвей обмотки.

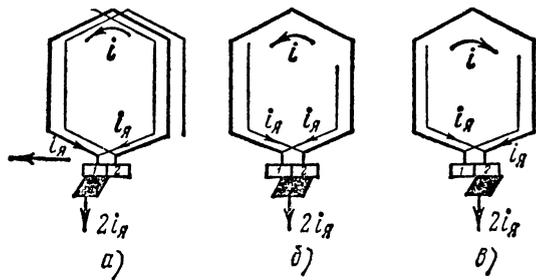


Рис. 122. Коммутируемая секция обмотки: а — до начала коммутации, б — при коммутации, в — по окончании коммутации; 1 и 2 — пластины

При вращении якоря его обмотка и коллектор перемещаются относительно неподвижной щетки справа налево. В некоторый момент, соответствующий началу коммутации, щетка соприкасается с коллекторной пластиной 1, соединенной с двумя проводниками обмотки, в каждом из которых проходит ток одной параллельной ветви. Таким образом, через коллекторную пластину и щетку проходит ток, равный сумме токов двух параллельных ветвей $2i_a$. В выделенной нами секции ток равен току одной параллельной ветви и в данный момент направлен против часовой стрелки.

В дальнейшем при вращении якоря щетка будет соприкасаться с коллекторными пластинами 1 и 2, замыкая рассматриваемую нами секцию (рис. 122, б). В определенный момент щетка полностью перейдет на коллекторную пластину 2, и ток в этой секции изменит направление на обратное (рис. 122, в), т. е. секция переключится из одной параллельной ветви в другую. Время переключения секции, называемое п е р и о д о м к о м м у т а ц и и, мало, и за это время в секции ток изменяется от $+i_a$ до $-i_a$.

При изменении тока в секции создается эдс самоиндукции, которая может достигать сравнительно больших значений.

Кроме того, поскольку процесс коммутации происходит одновременно в нескольких секциях под всеми щетками, то в каждой секции создаются эдс взаимной индукции.

Эдс самоиндукции и взаимной индукции, называемые реактивными эдс, препятствуя изменениям тока, вызывают неравномерное распределение плотности тока под щеткой, что является причиной образования искрения, которое особенно интенсивно в момент размыкания щеткой секции обмотки.

Чрезмерная плотность тока при наличии разности потенциалов между щеткой и коллектором приводит к образованию дугового разряда, который ионизирует тончайшие слои воздуха, находящегося между щеткой и коллектором и способствует развитию дуги. Дуга может перейти к щетке другой полярности, образовав круговой огонь на коллекторе, и это приведет к повреждению последнего.

Искрение щеток может быть также вызвано рядом других причин: неровностью поверхности коллектора, биением щеток, загрязненностью поверхности коллектора, наличием влаги на ней и т. д.

Даже незначительное искрение щеток нежелательно, так как увеличивается износ щеток и коллектора и повышается нагрев последнего вследствие увеличения переходного сопротивления между щеткой и коллектором.

Наиболее эффективным способом улучшения коммутации является компенсация реактивных эдс. Для этого в зоне коммутации, в которой находятся активные стороны коммутируемых секций, необходимо создать такое внешнее магнитное поле, при котором индуцируемая в секциях эдс вращения e_v будет равна и противоположна реактивной эдс e_r , т. е. $e_v = -e_r$. Для создания такого внешнего магнитного поля устанавливают дополнительные полюсы N_k и S_k , размещая их между главными полюсами.

Если якорь (рис. 123) вращается каким-либо двигателем в направ-

лении часовой стрелки, то в обмотке якоря индуцируется эдс и при нагрузке проходит ток. Направления эдс и тока в проводниках обмотки совпадают. На схеме выделены проводники 1 и 2 коммутируемой секции. Реактивная эдс e_r , препятствуя изменениям тока в коммутируемой секции, будет направлена в проводниках 1 и 2 встречно изменениям тока. Для компенсации реактивной эдс в проводниках 1 и 2 нужно создать эдс вращения $e_v = -e_r$, для чего и установлены дополнительные полюсы N_k и S_k .

Таким образом, полярность дополнительного полюса в генераторе должна соответствовать полярности следующего за ним в направлении вращения якоря главного полюса. В двигателе полярность дополнительного полюса должна соответствовать полярности предыдущего по направлению вращения якоря главного полюса.

Обмотку возбуждения дополнительных полюсов соединяют последовательно с обмоткой якоря для того, чтобы реактивная эдс была компенсирована при любой нагрузке машины. Для этой же цели магнитная цепь дополнительных полюсов ненасыщена, т. е. между сердечником якоря и дополнительным полюсом создан сравнительно большой воздушный промежуток. Так как реактивная эдс пропорциональна току в якоря, то она компенсируется при любой нагрузке машины в том случае, если эдс вращения также пропорциональна току нагрузки. Поэтому магнитное поле в зоне коммутации должно изменяться пропорционально току якоря.

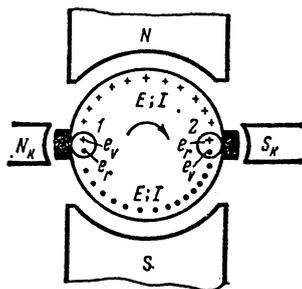


Рис. 123. Полярность дополнительных полюсов в генераторах постоянного тока: 1 и 2 проводники

§ 94. Работа машины постоянного тока в режиме генератора

Якорь генератора приводится во вращение каким-либо двигателем, развивающим вращающий момент M_1 . При перемещении проводников обмотки якоря в магнитном поле полюсов в них индуцируется эдс, направление которой определяется правилом правой руки (рис. 124). Если якорь вращается с частотой в минуту n , то в его обмотке индуцируется эдс $E = Cn\Phi$.

Если обмотку якоря через щетки замкнуть на какой-либо приемник энергии R_n (сопротивление нагрузки), то через этот приемник и обмотку якоря будет проходить ток I , направление которого в обмотке якоря совпадает с направлением эдс. В результате взаимодействия этого тока с магнитным полем полюсов создается электромагнитный момент M_2 , направление которого определяется правилом левой руки.

Таким образом, развиваемый машиной электромагнитный момент является тормозным, направленным встречно направлению вращения якоря машины, так что для вращения последнего первичный двигатель должен развивать вращающий момент M_1 , достаточный для

преодоления электромагнитного тормозного момента, следовательно, машина потребляет механическую энергию.

В случае равновесия моментов, т. е. $M_1 = M_2$, якорь машины вращается с неизменной частотой. При нарушении равновесия моментов частота вращения якоря начнет изменяться. Если почему-либо момент первичного двигателя уменьшится, т. е. станет меньше электромагнитного момента генератора ($M_1 < M_2$), вращение якоря машины начнет замедляться. При этом будет уменьшаться как эдс, так и ток в обмотке якоря, что понизит тормозной электромагнитный момент генератора. В случае увеличения момента первичного двигателя ($M_1 > M_2$) частота вращения якоря, а также эдс и ток в его обмотке будут возрастать, что увеличит тормозной электромагнитный момент.

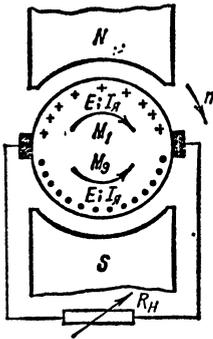


Рис. 124. Схема работы генератора постоянного тока

При нарушении равновесия моментов частота вращения якоря, эдс и ток в его обмотке претерпевают изменения до восстановления равновесия моментов, т. е. пока электромагнитный момент генератора не станет равным вращающему моменту

первичного двигателя.

Таким образом, любое изменение момента первичного двигателя, т. е. потребляемой генератором мощности, вызывает соответствующее изменение как электромагнитного момента генератора, так и вырабатываемой им мощности. Так же при изменениях нагрузки генератора потребуются соответствующее изменение момента первичного двигателя для поддержания постоянства частоты вращения якоря генератора.

Ток обмотки якоря I при нагрузке генератора встречает на своем пути сопротивление внешней нагрузки R_n , сопротивление обмотки якоря $R_{об}$ и сопротивление переходных контактов между щетками и коллектором $R_{щ}$. Обозначив через $R_я$ внутреннее сопротивление машины, представляющее собой сумму сопротивлений обмотки якоря и щеточных контактов ($R_{об} + R_{щ}$), для тока в якоре можем записать следующее выражение:
$$I = \frac{E}{R_я + R_n}.$$

Сопротивление $R_{щ}$ непостоянно и зависит от многих факторов: величины и направления тока, состояния коллектора, силы нажатия щеток на коллектор, частоты вращения. Падение напряжения в щеточных контактах остается примерно неизменным при изменениях нагрузки (принимается равным 2 В на пару угольных и графитных щеток). Поэтому внутреннее сопротивление машины $R_я$ также непостоянно при изменении нагрузки генератора.

Так как $IR_n = U$, где U — напряжение на зажимах генератора при нагрузке, то получим следующее уравнение равновесия эдс для генератора: $U = E - IR_я$.

Из уравнения равновесия эдс легко получить уравнение мощностей, т. е. $UI = EI - IR_я^2$ или $P_2 = P_3 - I^2 R_я$, где P_2 — полезная мощность генератора, отдаваемая потребителю электрической энергии; P_3 — внутренняя или электромагнитная мощность генератора, преобразо-

ванная им в электрическую; $I^2 R_a = P_{06}$ — потери мощности в обмотке якоря и щеточных контактах.

При холостом ходе генератора электромагнитная мощность равна нулю ($P_g = 0$), но для вращения якоря машины первичный двигатель должен затратить некоторую мощность P_0 , расходуемую на покрытие потерь холостого хода. Мощность P_0 складывается из механических потерь на трение в подшипниках и трение о воздух вращающихся частей машины $P_{мех}$ и из потерь в стали на гистерезис и вихревые токи $P_{ст}$. В генераторах с самовозбуждением мощность P_0 включает также мощность, затраченную на создание магнитного потока, т. е. на возбуждение машины.

При нагрузке генератора первичный двигатель затрачивает мощность $P_1 = P_g + P_0$.

Электромагнитный момент машины $M_g = P_g / \Omega$, где $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ рад/с — угловая скорость якоря.

Так как $P_g = EI$ и $E = \frac{pN}{60a} n\Phi$, то электромагнитный момент машины определится следующим выражением: $M_g = \frac{pN}{2\pi a} I\Phi$.

Величины a , p и N постоянны для данной машины, поэтому выражение $\frac{pN}{2\pi a} = K$ представляет собой некоторый постоянный для данной машины коэффициент, и электромагнитный момент равен: $M_g = KI\Phi$, т. е. электромагнитный момент пропорционален произведению тока в якоря на магнитный поток полюсов.

§ 95. Способы возбуждения генераторов постоянного тока

Генераторы постоянного тока могут быть выполнены с магнитным и электромагнитным возбуждением. Для создания магнитного потока в генераторах с магнитным возбуждением используют постоянные магниты, а в генераторах с электромагнитным возбуждением — электромагниты. Постоянные магниты применяют лишь в машинах очень малых мощностей. Таким образом, электромагнитное возбуждение является наиболее широко используемым способом для создания магнитного потока. При этом способе возбуждения магнитный поток создается током, проходящим по обмотке возбуждения.

В зависимости от способа питания обмотки возбуждения генераторы постоянного тока могут быть с независимым возбуждением и с самовозбуждением.

При независимом возбуждении (рис. 125, а) обмотка возбуждения включается в сеть вспомогательного источника энергии постоянного тока. Для регулирования тока возбуждения I_b в цепи обмотки включено сопротивление R_p . При таком возбуждении ток I_b не зависит от тока в якоря I .

Недостатком генераторов независимого возбуждения является потребность в дополнительном источнике энергии. Поэтому генераторы независимого возбуждения находят очень ограниченное приме-

нение только в машинах высоких напряжений, у которых питание обмотки возбуждения от цепи якоря недопустимо по конструктивным соображениям.

Генераторы с самовозбуждением в зависимости от включения обмотки возбуждения могут быть параллельного (рис. 125, б), после-

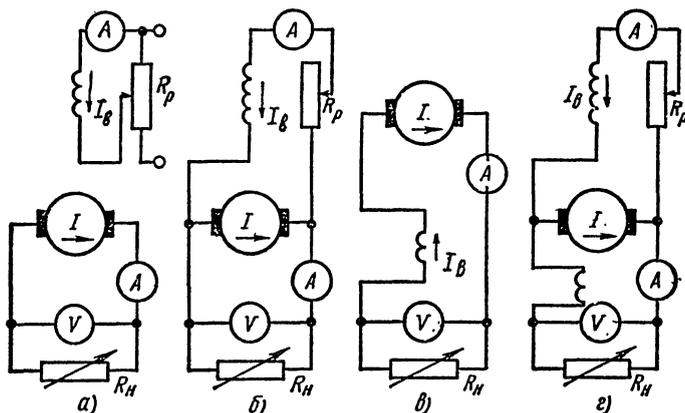


Рис. 125. Схемы возбуждения генераторов постоянного тока:
 а — независимого, б — параллельного, в — последовательного, г — смешанного

довательного (рис. 125, в) и смешанного (рис. 125, г) возбуждения.

У генераторов параллельного возбуждения ток мал (несколько процентов номинального тока якоря), и обмотка возбуждения имеет большое число витков. При последовательном возбуждении ток возбуждения равен току якоря и обмотка возбуждения имеет малое число витков.

При смешанном возбуждении на полюсах генератора помещаются две обмотки возбуждения — параллельная и последовательная.

Процесс самовозбуждения генераторов постоянного тока протекает одинаково при любой схеме возбуждения. Рассмотрим, например, процесс самовозбуждения в генераторах параллельного возбуждения, получивших наиболее широкое применение. Какой-либо первичный двигатель вращает якорь генератора, магнитная цепь (ядро и сердечники полюсов) которого имеет небольшой остаточный магнитный поток Φ_0 . Этим магнитным потоком в обмотке вращающегося якоря индуцируется эдс E_0 , составляющая несколько процентов номинального напряжения машины.

Под действием эдс E_0 в замкнутой цепи, состоящей из якоря и обмотки возбуждения, проходит ток I_B . Магнитодвижущая сила обмотки возбуждения ωI_B (ω — число витков) направлена согласно с потоком остаточного магнетизма, увеличивая магнитный поток машины Φ , что вызывает повышение как эдс в обмотке якоря E , так и тока в обмотке возбуждения I_B . Увеличение последнего приводит к дальнейшему возрастанию Φ , что, в свою очередь, увеличивает E и I_B .

Из-за насыщения стали магнитной цепи машины самовозбуждение происходит не беспредельно, а до какого-то определенного напряжения, зависящего от частоты вращения якоря машины и сопротивления в цепи обмотки возбуждения. При насыщении стали магнитной цепи увеличение магнитного потока замедляется и процесс самовозбуждения заканчивается. Увеличение сопротивления в цепи обмотки возбуждения уменьшает как ток в ней, так и магнитный поток, возбуждаемый этим током. Поэтому уменьшается эдс и напряжение, до которого возбуждается генератор.

Напряжение так же, как и эдс, прямо пропорционально частоте, вследствие чего с изменением частоты вращения изменяется и напряжение, до которого возбуждается генератор.

§ 96. Характеристики генераторов постоянного тока

Характеристики генератора определяют его рабочие свойства и представляют зависимость между основными величинами, которыми являются эдс в обмотке якоря E , напряжение на его зажимах U , ток в якоря I , ток возбуждения I_B и частота вращения якоря n .

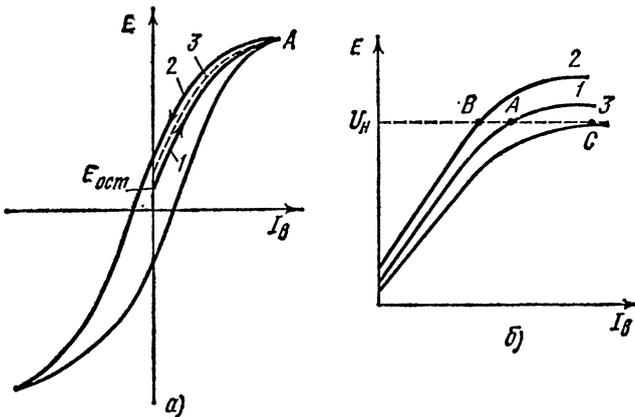


Рис. 126. Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения: а — при перемагничивании стали, б — при изменении частоты вращения якоря

Характеристики представляют собой зависимости между двумя из указанных основных величин при неизменных остальных. Эти зависимости имеют различный вид для генераторов разных типов.

Снятие всех характеристик машины производится при постоянной частоте вращения якоря, так как при изменении частоты значительно изменяются все характеристики генератора.

Характеристика холостого хода генератора представляет собой зависимость между эдс в якоря и током возбуждения, снятую при отсутствии нагрузки и постоянной частоте вращения.

Для генераторов независимого возбуждения при отсутствии нагрузки (холостой ход) ток в якоря равен нулю. Так как эдс, индукти-

рованная в обмотке якоря, равна $E = Cn\Phi$, то при постоянной частоте вращения эдс окажется прямо пропорциональной магнитному потоку. Поэтому в измененном масштабе характеристика холостого хода представляет магнитную характеристику машины.

При $I_{\text{в}} = 0$ магнитная цепь машины (главным образом ярмо) имеет некоторый остаточный магнитный поток Φ_0 , который индуцирует в обмотке якоря эдс E (рис. 126, а). Эта эдс составляет несколько процентов (2—5%) номинального напряжения машины. С увеличением тока в обмотке возбуждения возрастают как магнитный поток, так и эдс, индуцированная в обмотке якоря. Таким образом, при постоянном постепенном увеличении $I_{\text{в}}$ возрастает и эдс (кривая 1). Если после снятия восходящей ветви от точки А начать постепенно понижать ток возбуждения $I_{\text{в}}$, то эдс также начнет уменьшаться, но за счет гистерезиса нисходящая ветвь (кривая 2) пойдет несколько выше восходящей ветви этой характеристики. Изменяя $I_{\text{в}}$ не только по величине, но и по направлению, можно снять весь цикл перемагничивания стали машины.

Практически восходящая и нисходящая ветви магнитной характеристики имеют крайне незначительное расхождение, и за основную характеристику принимается средняя зависимость (кривая 3).

На рис. 126, б показаны характеристики холостого хода, снятые при различной частоте вращения якоря генератора.

Вращению якоря машины с номинальной частотой n_n , указанной в паспорте генератора, соответствует кривая 1. Для всех машин нормального типа точка номинального напряжения (точка А) находится на перегибе магнитной характеристики.

Выбор точки номинального напряжения на линейном участке магнитной характеристики приводит к резким колебаниям напряжения на зажимах генератора при нагрузке, так как незначительные колебания магнитодвижущей силы вызывают резкое изменение эдс. Выбор этой точки на пологом участке магнитной характеристики приводит к ограничению регулирования напряжения на зажимах генератора, так как для изменения эдс требуются очень большие изменения тока возбуждения.

При частоте вращения, отличной от номинальной частоты вращения якоря генератора, меняется характеристика холостого хода, так как эдс пропорциональна частоте. При $n' > n_n$ характеристика холостого хода расположится выше (кривая 2), а при $n' < n_n$ — ниже (кривая 3), чем при номинальной частоте вращения.

Следовательно, при изменении частоты вращения якоря точка номинального напряжения окажется либо на линейном (точка В), либо на пологом (точка С) участке магнитной характеристики, что вызывает изменение всех характеристик генератора. Поэтому первичный двигатель для вращения якоря генератора надо выбирать так, чтобы его частота вращения была близкой к номинальной частоте генератора.

Для генераторов параллельного возбуждения при холостом ходе ток в якоре равен току возбуждения ($I = I_{\text{в}}$). Так как этот ток составляет малую величину (несколько процентов номинального тока гене-

ратора), то напряжение на зажимах машины при холостом ходе будет примерно равным эдс и характеристика холостого хода этого генератора практически совпадет с характеристикой генератора независимого возбуждения. Однако весь цикл перемагничивания в генераторах параллельного возбуждения снять нельзя, так как при изменении

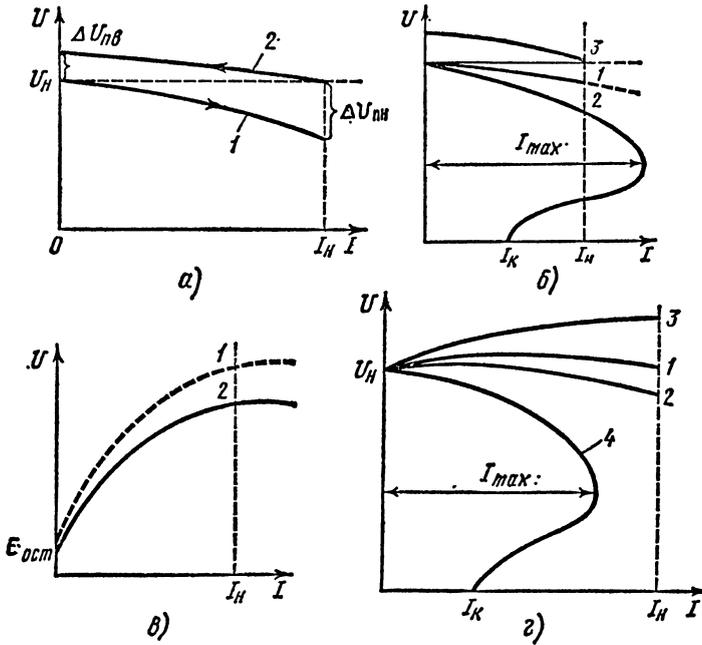


Рис. 127. Внешние характеристики генератора независимого (а), параллельного (б), последовательного (в) и смешанного (г) возбуждения

направления тока в обмотке возбуждения магнитный поток ее будет направлен встречно потоку остаточного магнетизма и самовозбуждение генератора окажется невозможным.

Для генератора последовательного возбуждения характеристика холостого хода смысла не имеет, так как при холостом ходе в якоре и обмотке возбуждения ток равен нулю, и характеристика может быть снята только по схеме независимого возбуждения. Для этого обмотка возбуждения генератора должна быть включена в сеть какого-либо независимого источника тока.

Для генераторов смешанного возбуждения характеристика холостого хода совпадает с характеристикой генератора параллельного возбуждения.

Внешняя характеристика представляет собой зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки. Эта характеристика соответствует естественным условиям работы машины, т. е. машина нерегулируема (сопротивление цепи возбуждения R_v постоянно) и снимается при неизменной частоте вращения.

Для генераторов независимого возбуждения при постоянном $R_{\text{в}}$ неизменен также и ток возбуждения $I_{\text{в}}$. Внешние характеристики такого генератора показаны на рис. 127, а.

Кривая 1 представляет собой внешнюю характеристику на понижение напряжения, соответствующую току обмотки возбуждения, при котором напряжение генератора равно номинальному при холостом ходе. С возрастанием нагрузки (тока I в якоре генератора) увеличивается как падение напряжения в сопротивлении его обмотки, так и размагничивающее действие реакции якоря, что вызывает понижение напряжения. При изменении нагрузки от нуля до номинальной напряжения на зажимах генератора уменьшается на величину $\Delta U_{\text{пн}}$.

Характеристике на повышение напряжения (кривая 2) соответствует такой ток возбуждения, чтобы при номинальной нагрузке генератора напряжение на его зажимах было равно номинальному, после чего нагрузка генератора уменьшается.

С уменьшением нагрузки (тока в якоре) также снижается как падение напряжения в сопротивлении обмотки якоря и щеточных контактах, так и размагничивающее действие реакции якоря, что вызывает повышение напряжения. При изменении нагрузки от номинальной до 0 напряжения на зажимах генератора увеличивается на величину $\Delta U_{\text{пв}}$. За счет насыщения стали повышение напряжения меньше, чем понижение, так как размагничивающее действие реакции якоря будет сказываться тем сильнее, чем меньше степень насыщения стали.

В генераторах параллельного возбуждения при постоянном сопротивлении цепи возбуждения $R_{\text{в}}$ ток возбуждения не остается постоянным, так как зависит от напряжения на зажимах генератора, которое при изменении нагрузки меняется. В генераторах независимого возбуждения увеличение нагрузки вызывает понижение напряжения под воздействием падения напряжения в сопротивлении машины и реакции якоря (кривая 1 на рис. 127, б).

В генераторах параллельного возбуждения при уменьшении напряжения также уменьшается ток возбуждения, что вызывает уменьшение магнитного потока и понижение напряжения. Следовательно, при увеличении нагрузки напряжение на зажимах генератора этого типа уменьшается в большей мере (кривая 2), чем в генераторах независимого возбуждения.

Уменьшение внешнего сопротивления нагрузки вызывает увеличение тока до некоторого значения $I_{\text{макс}}$, не превышающего номинальный ток более чем в 2—2,5 раза. При дальнейшем уменьшении внешнего сопротивления ток уменьшается и при коротком замыкании будет значительно меньше номинального. Понижение сопротивления нагрузки вызывает уменьшение тока возбуждения, так как напряжение генератора понижается. Если ток возбуждения уменьшился настолько, что машина оказалась размагниченной, то эдс понижается в большей степени, чем сопротивление нагрузки, что вызывает уменьшение тока в якоре.

При коротком замыкании генератора параллельного возбуждения ток $I_{\text{в}}$ равен нулю, и обмотка возбуждения не создает магнитного

потока. Поэтому в обмотке якоря будет эдс только от остаточного магнитного потока E_0 , имеющая малое значение, и, следовательно, ток короткого замыкания I_k будет также мал.

Внешняя характеристика на повышение напряжения у генератора параллельного возбуждения (кривая 3) имеет такой же вид, как у генератора независимого возбуждения.

Для генератора последовательного возбуждения внешняя характеристика показана на рис. 127, в. В генераторах этого типа ток возбуждения равен току якоря ($I_v = I$), и при холостом ходе ($I = 0$) в обмотке якоря будет создана эдс E_0 за счет остаточного магнетизма. С увеличением нагрузки также возрастет ток в обмотке возбуждения, что вызывает увеличение эдс (кривая 1). Напряжение на зажимах генератора при нагрузке меньше эдс вследствие падения напряжения в сопротивлении машины и реакции якоря (кривая 2). Таким образом, у генераторов последовательного возбуждения напряжение резко меняется с изменением нагрузки, поэтому они не нашли применения.

В генераторах смешанного возбуждения возможно согласное и встречное включение последовательной и параллельной обмоток.

При согласном включении обмоток возбуждения результирующая магнитодвижущая сила, создающая магнитный поток, равна сумме магнитодвижущих сил параллельной и последовательной обмоток, а при встречном включении — разности этих магнитодвижущих сил.

На рис. 127, г показаны внешние характеристики генератора смешанного возбуждения. С увеличением нагрузки такого генератора уменьшается напряжение на его зажимах в результате падения напряжения в его сопротивлении и реакции якоря. Однако с увеличением нагрузки возрастает также ток в последовательной обмотке возбуждения. Поэтому при согласном включении обмоток увеличение нагрузки вызывает увеличение магнитного потока и эдс обмотки якоря. Если эдс с повышением нагрузки возрастает на величину, равную понижению напряжения генератора, так как падает напряжение в его сопротивлении и реакции якоря, то напряжение на зажимах генератора будет практически оставаться неизменным при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной (кривая 1). Такой генератор, называемый нормально возбужденным, не требует регулировки тока возбуждения при изменениях нагрузки. При уменьшении числа витков последовательной обмотки эдс с возрастанием нагрузки будет увеличиваться в меньшей степени и не будет компенсировать понижения напряжения, так что напряжение на зажимах генератора будет уменьшаться (кривая 2), т. е. генератор недовозбужден. Если число витков последовательной обмотки возбуждения больше, чем то, которое соответствует нормальному возбуждению машины, то генератор окажется перевозбужденным, и напряжение на его зажимах будет возрастать с увеличением нагрузки (кривая 3).

При встречном включении обмоток возбуждения внешняя характеристика подобна внешней характеристике генератора параллельного возбуждения (кривая 4), однако токи максимальный I_{\max} и короткого замыкания I_k у генератора смешанного возбуждения будут меньше соответствующих токов генератора параллельного возбуж-

дения в результате размагничивающего действия магнитодвижущих сил последовательной обмотки.

Наиболее часто применяют генераторы нормально возбужденные, а также перевозбужденные, позволяющие компенсировать падение напряжения в линии, соединительных проводах и т. д. с тем, чтобы напряжение на нагрузке оставалось постоянным при изменении тока.

Генераторы со встречным включением обмоток возбуждения не обеспечивают постоянства напряжения и поэтому широкого применения не нашли. Их используют лишь в тех случаях, когда необходимо ограничить токи коротких замыканий (например, при электросварке).

Регулировочная характеристика генератора представляет собой зависимость тока возбуждения от тока нагрузки, снимаемая при постоянном напряжении на зажимах генератора. Регулировочная характеристика генератора показывает, в какой мере следует изменить ток в обмотке возбуждения для того, чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось постоянным при изменении тока нагрузки.

В генераторах независимого и параллельного возбуждения с увеличением тока нагрузки необходимо увеличить ток возбуждения для того, чтобы скомпенсировать падение напряжения на внутреннем сопротивлении машины и размагничивающее действие потока реакции якоря.

В генераторах смешанного возбуждения (нормально возбужденных) напряжение при изменении нагрузки не претерпевает изменений, и, следовательно, необходимость регулирования тока возбуждения отпадает, т. е. регулировочная характеристика в таких генераторах не имеет смысла, так как ток возбуждения постоянен при изменениях тока нагрузки.

§ 97. Работа машины постоянного тока в режиме двигателя

При включении двигателя постоянного тока в сеть под действием приложенного напряжения проходит ток как в обмотке якоря, так и в обмотке возбуждения. Ток возбуждения создает магнитный поток полюсов.

В результате взаимодействия тока в проводниках обмотки якоря с магнитным полем полюсов создается вращающий момент и якорь машины приходит во вращение. Таким образом, электрическая энергия преобразуется в энергию механическую.

Положим, что генератор параллельного возбуждения включен в сеть большой мощности (рис. 128). Ток нагрузки генератора определяется следующим выражением:

$$I = \frac{E - U}{R_{\text{я}}},$$

где I — ток в обмотке якоря, $R_{\text{я}}$ — сопротивление этой обмотки; E — эдс, индуцируемая в этой же обмотке; U — напряжение сети.

Направление эдс и тока в активных проводах якоря показано на схеме (рис. 129, а). Машина развивает электромагнитный момент M_a , являющийся тормозным, т. е. потребляет механическую энергию и вырабатывает энергию электрическую.

Если понизить ток возбуждения, то уменьшится как магнитный

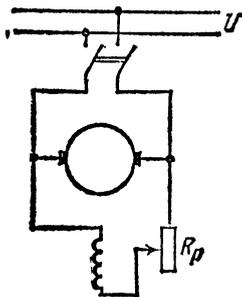


Рис. 128. Схема включения генератора параллельного возбуждения в сеть

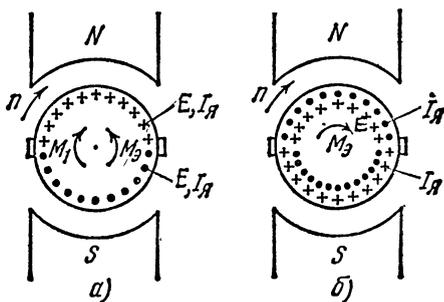


Рис. 129. Схема работы машины постоянного тока в режимах: а — генератора, б — двигателя

поток, так и эдс, индуктируемая в обмотке якоря. Это вызовет уменьшение нагрузки генератора. Изменяя сопротивление регулировочного реостата, можно довести ток возбуждения до такой величины, при которой эдс в обмотке якоря равна напряжению сети ($E=U$) и ток в якоря равен нулю, т. е. генератор работает вхолостую.

При токе возбуждения, меньшем тока, соответствующего холостой работе генератора, эдс обмотки якоря будет меньше напряжения сети, и ток в якоря изменит направление на обратное (рис. 129, б).

При изменении направления тока в проводниках обмотки якоря также изменится направление электромагнитного момента M_a , развиваемого машиной, т. е. момент станет вращающим. Таким образом, машина, потребляя электрическую энергию, вырабатывает энергию механическую, т. е. работает двигателем.

Если отключить первичный двигатель, то якорь машины будет продолжать вращаться под действием развиваемого электромагнитного момента M_a .

При вращении якоря в проводниках его обмотки индуктируется эдс, направление которой противоположно направлению тока. Поэтому ее называют *прот и в о - э д с* или *о б р а т н о й э д с*.

Противо-эдс играет роль регулятора потребляемой мощности, т. е. потребляемый ток изменяется вследствие изменения противо-эдс, равной $E=Cn\Phi$. Вращающий момент, развиваемый двигателем, $M_a = KI\Phi$.

Приложенное напряжение уравнивается противо-эдс и падением напряжения в сопротивлении обмотки якоря и щеточных контактов. Следовательно,

$$U = E + IR_a.$$

Ток в обмотке и частота вращения якоря определяются следующими

выражениями:

$$I = \frac{U - E}{R_{\text{я}}} \quad \text{и} \quad n = \frac{U - IR_{\text{я}}}{C\Phi}.$$

Направление вращения якоря двигателя зависит от полярности полюсов и от направления тока в проводниках обмотки якоря. Таким образом, для реверсирования двигателя, т. е. для изменения направления вращения якоря, нужно либо изменить полярность полюсов, переключив обмотку возбуждения, либо изменить направление тока в обмотке якоря.

Обмотка возбуждения обладает значительной индуктивностью, и переключение ее нежелательно. Поэтому реверсирование двигателей постоянного тока обычно заключается в переключении обмотки якоря.

§ 98. Пуск двигателей постоянного тока

В начальный момент пуска в ход якорь двигателя неподвижен и противо-эдс равна нулю ($E=0$). При непосредственном включении двигателя в сеть в обмотке якоря будет протекать чрезмерно большой ток $I_{\text{пуск}} = U/R_{\text{я}}$. Поэтому непосредственное включение в сеть допускается только для двигателей очень малой мощности, у которых падение напряжения в якоре представляет относительно большую величину и броски тока не столь велики.

В машинах постоянного тока большой мощности падение напряжения в обмотке якоря при полной нагрузке составляет несколько процентов от номинального напряжения, т. е. $IR_{\text{я}} = (0,02 \div 0,1)U$.

Следовательно, пусковой ток в случае включения двигателя в сеть с номинальным напряжением во много раз превышает номинальный.

Для ограничения пускового тока используют пусковые реостаты, включаемые последовательно с якорем двигателя при пуске в ход. Пусковые реостаты представляют собой проволочные сопротивления, рассчитываемые на кратковременный режим работы, и выполняются ступенчатыми, что дает возможность изменять ток в якоре двигателя в процессе пуска его в ход.

Схема двигателя параллельного возбуждения с пусковым реостатом показана на рис. 130, а. Пусковой реостат этого двигателя имеет три зажима, обозначаемые буквами *Л*, *Я*, *Ш*. Зажим *Л* соединен с движком реостата и подключается к одному из полюсов рубильника (к линии). Зажим *Я* соединяется с сопротивлением реостата и подключается к зажиму якоря. Зажим *Ш* соединен с металлической шиной, помещенной на реостате (шунт). Движок реостата скользит по шине так, что между ними имеется непрерывный контакт. К зажиму *Ш* через регулировочное сопротивление R_p присоединяется обмотка возбуждения. Вторые зажимы якоря и обмотки возбуждения соединены между собой перемычкой и подключены ко второму полюсу рубильника, включающего двигатель в сеть.

При пуске в ход включается рубильник и движок реостата переводится на контакт *1*, так что последовательно с якорем соединено полное сопротивление пускового реостата *ПР*, которое выбирается

таким, чтобы наибольший ток при пуске в ход I_{\max} не превышал номинальный ток более чем в 1,7—2,5 раза, т. е. $R_n = U/I_{\max} - R_n$.

При включении двигателя в сеть по обмотке возбуждения также проходит ток, возбуждающий магнитный поток. В результате взаимодействия тока в якоре с магнитным полем полюсов создается пусковой момент.

Если пусковой момент окажется больше тормозного момента на

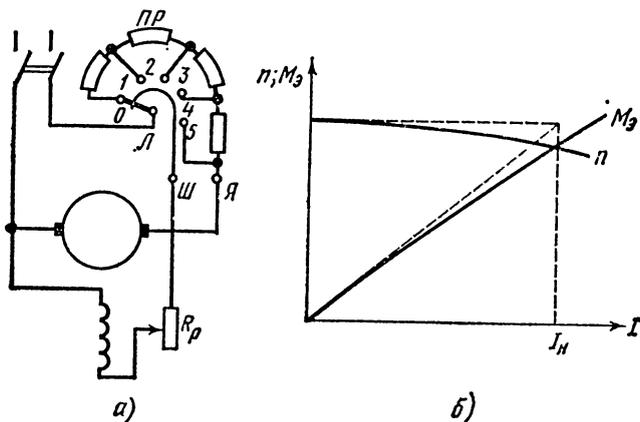


Рис. 130. Схема (а) и характеристики (б) двигателя параллельного возбуждения

валу двигателя ($M_{\text{пуск}} > M_T$), то якорь машины придет во вращение. Под действием инерции частота вращения не может претерпевать мгновенных изменений и будет постепенно увеличиваться. Вместе с ней возрастает противо-эдс и ток в якоре начнет уменьшаться, что вызывает уменьшение вращающего момента двигателя.

В рабочем режиме сопротивление пускового реостата должно быть полностью выведено, так как оно рассчитано на кратковременный режим работы и при длительном прохождении тока выйдет из строя.

Когда ток в якоре уменьшится до небольшого значения I_{\min} , движок пускового реостата переводится на контакт 2. При этом сопротивление пускового реостата уменьшится на одну ступень, что увеличит ток. Сопротивление всех ступеней пускового реостата выбирают так, чтобы при переводе движка реостата с одного контакта на другой ток в якоре изменялся от I_{\min} до I_{\max} .

С увеличением тока в якоре возрастает вращающий момент, вследствие чего частота вращения вновь увеличивается. С увеличением частоты вращения якоря возрастает противо-эдс, что вызовет уменьшение тока в якоре. Когда ток в якоре достигает вновь наименьшего значения, движок реостата переводится на контакт 3.

Таким образом, сопротивление пускового реостата постепенно (ступенями) уменьшается, пока оно полностью не будет выведено (движок реостата на контакте 5), и в рабочем режиме ток и частота

вращения якоря принимают установившиеся значения, соответствующие тормозному моменту на валу двигателя.

Наименьший ток при пуске в ход зависит от режима работы двигателя. Если двигатель пускается при полной нагрузке, то $I_{\min} = 1,1I_n$. При пуске двигателя без нагрузки или при малых нагрузках этот ток может быть меньше номинального тока двигателя.

Число ступеней пускового реостата зависит от разности $I_{\max} - I_{\min}$, причем чем меньше разность этих токов, тем больше число ступеней. Обычно пусковые реостаты имеют от 2 до 7 ступеней. При пуске двигателя в ход регулировочное сопротивление R_p в цепи возбуждения должно быть полностью выведено, т. е. ток возбуждения должен быть наибольшим, что дает возможность уменьшить пусковой ток. Для пуска двигателя необходимо создать пусковой момент, больший тормозного момента на валу.

Так как $M_{\text{пуск}} = KI_{\text{пуск}}\Phi$, то для уменьшения пускового тока надо увеличить магнитный поток, т. е. увеличить ток в обмотке возбуждения.

Металлическая шина пускового реостата соединена с зажимом 1. Это необходимо для того, чтобы при отключении двигателя от сети не было разрыва цепи обмотки возбуждения, имеющей значительную индуктивность.

При отключении двигателя движок пускового реостата переводится на холостой контакт 0 и рубильник отключается. При этом обмотка возбуждения будет замкнута на сопротивление пускового реостата и якоря, что дает возможность избежать перенапряжений и дугообразования.

§ 99. Характеристики двигателей постоянного тока

Рабочие свойства двигателей определяются их рабочими характеристиками, представляющими собой зависимости частоты вращения n , вращающего момента M_a , потребляемого тока I , мощности P_1 и КПД η от полезной мощности на валу P_2 . Эти зависимости соответствуют естественным условиям работы двигателя, т. е. машина не регулируется и напряжение сети остается постоянным. При изменении полезной мощности P_2 (т. е. нагрузки на валу) изменяется также и ток в якоре машины, поэтому рабочие характеристики часто строятся в зависимости от тока в якоре. Зависимости вращающего момента и частоты вращения от тока в якоре для двигателя параллельного возбуждения изображены на рис. 130, б.

Частота вращения двигателя определяется следующим выражением:

$$n = \frac{U - IR_a}{C\Phi}.$$

С увеличением нагрузки на валу двигателя возрастает также и ток в якоре. Это вызывает увеличение падения напряжения в сопротивлении обмотки якоря и щеточных контактах.

Так как ток возбуждения остается неизменным (машина нерегулируема), то магнитный поток также постоянен. Однако при повыше-

нии тока в якоре увеличивается размагничивающее действие потока реакции якоря и магнитный поток Φ несколько уменьшится. Увеличение $IR_{я}$ вызывает понижение частоты вращения двигателя, а уменьшение Φ повышает частоту. Обычно падение напряжения влияет на

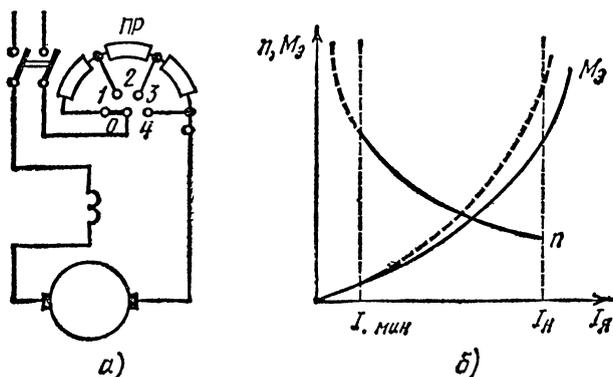


Рис. 131. Схема (а) и характеристики (б) двигателя последовательного возбуждения

изменение частоты в несколько большей степени, чем реакция якоря, так что с увеличением тока в якоре частота уменьшается. Изменение частоты вращения у двигателя этого типа незначительно и не превышает 5% при изменении нагрузки от нуля до номинальной, т. е. двигатели параллельного возбуждения имеют жесткую скоростную характеристику.

Вращающий момент двигателя $M_z = K I \Phi$.

При неизменном магнитном потоке зависимость момента от тока в якоре может быть представлена прямой линией. Но под воздействием реакции якоря с увеличением нагрузки в некоторой степени уменьшится магнитный поток и зависимость момента отклонится вниз от прямой линии.

Схема двигателя последовательного возбуждения показана на рис. 131, а. Пусковой реостат этого двигателя имеет только два зажима, так как обмотка возбуждения и якорь образуют одну последовательную цепь. Характеристики двигателя изображены на рис. 131, б. Частота вращения двигателя последовательного возбуждения определяется следующим выражением: $n = \frac{U - I(R_{я} + R_c)}{C\Phi}$,

где R_c — сопротивление последовательной обмотки возбуждения.

В двигателе последовательного возбуждения магнитный поток не остается постоянным, а резко изменяется с изменением нагрузки, что вызывает значительное изменение частоты вращения. Так как падение напряжения в сопротивлении якоря и в обмотке возбуждения очень мало в сравнении с приложенным напряжением, то частоту вращения можно приближенно определить следующим выражением: $n = U/C\Phi$.

Если пренебречь насыщением стали, то можно считать магнитный поток пропорциональным току в обмотке возбуждения, который равен

току в якоре. Следовательно, у двигателя последовательного возбуждения частота вращения обратно пропорциональна току в якоре и она резко уменьшается с увеличением нагрузки, т. е. двигатель имеет мягкую скоростную характеристику. С уменьшением нагрузки частота вращения двигателя увеличивается. При холостом ходе ($I_{\text{я}}=0$) частота вращения двигателя беспредельно возрастает, т. е. двигатель идет в разнос.

Таким образом, характерным свойством двигателей последовательного возбуждения является недопустимость сброса нагрузки, т. е. работы вхолостую или при малых нагрузках. Двигатель имеет минимальную допустимую нагрузку, составляющую 25—30% номинальной. При нагрузке меньше минимально допустимой частота вращения двигателя резко увеличивается, что может вызвать его разрушение. Поэтому, когда возможны сбросы или резкие уменьшения нагрузки, двигатели последовательного возбуждения не применяют.

В двигателях очень малых мощностей сброс нагрузки не вызывает разноса, так как механические потери их будут достаточно большой нагрузкой для них.

Вращающий момент двигателя последовательного возбуждения, учитывая пропорциональную зависимость между магнитным потоком и током в якоре ($\Phi=C'I$), можно определить следующим выражением:

$$M_{\text{э}} = KI\Phi = K'I^2,$$

где $K'=KC'$, т. е. вращающий момент пропорционален квадрату тока. Однако при больших токах сказывается насыщение стали и зависимость момента приближается к прямой линии. Таким образом, двигатели этого типа развивают большие вращающие моменты, что имеет существенное значение при пуске больших инерционных масс и перегрузках. Эти двигатели широко используют в транспортных и подъемных устройствах.

При смешанном возбуждении возможно как согласное, так и встречное включение обмоток возбуждения.

Двигатели со встречным включением обмоток не нашли широкого применения, так как они обладают плохими пусковыми свойствами и работают неустойчиво.

Характеристики двигателей смешанного возбуждения занимают промежуточное положение между характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения.

§ 100. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока

Двигатели постоянного тока получили широкое распространение и часто являются незаменимыми благодаря ценному свойству — возможности плавно и экономично регулировать частоту вращения в широких пределах.

Частота вращения якоря двигателя при любой схеме возбуждения

определяется следующим выражением:

$$n = \frac{U - I(R_{я} - R_c)}{C\Phi},$$

где R_c — сопротивление последовательной обмотки возбуждения (для двигателя параллельного возбуждения $R_c = 0$).

Это выражение показывает, что частота вращения двигателя зависит от напряжения сети, сопротивления цепи якоря и магнитного потока.

Частоту вращения регулируют путем изменения напряжения сети в том случае, когда источником электрической энергии двигателя является какой-либо генератор.

Для регулирования частоты вращения двигателя изменением сопротивления цепи якоря используют регулировочный реостат, включенный последовательно с якорем. В отличие от пускового регулировочный реостат должен быть рассчитан на длительное прохождение тока. В сопротивлении регулировочного реостата происходит большая потеря энергии, вследствие чего резко уменьшается кпд двигателя.

Регулируют частоту вращения якоря двигателя изменением магнитного потока, который зависит от тока в обмотке возбуждения. В двигателях параллельного и смешанного возбуждения для изменения тока включают регулировочный реостат, а в двигателях последовательного возбуждения для этой цели шунтируют обмотку возбуждения каким-либо регулируемым сопротивлением. Последний способ регулирования частоты практически не создает дополнительных потерь и экономичен.

§ 101. Потери и кпд машин постоянного тока

В машинах постоянного тока при работе происходит потеря энергии, которая складывается из трех составляющих.

Первой составляющей являются потери в стали $P_{ст}$ на гистерезис и вихревые токи, возникающие в сердечнике якоря. При вращении якоря машины сталь его сердечника непрерывно перемагничивается. На ее перемагничивание затрачивается мощность, называемая потерями на гистерезис. Одновременно при вращении якоря в магнитном поле в сердечнике его индуктируются вихревые токи. Потери на гистерезис и вихревые токи, называемые потерями в стали, обращаются в тепло и нагревают сердечник якоря.

Потери в стали зависят от магнитной индукции и частоты перемагничивания сердечника якоря.

Магнитная индукция определяет эдс машины или, иначе, напряжение, а частота перемагничивания зависит от частоты вращения якоря. Поэтому при работе машины постоянного тока в режиме генератора или двигателя потери в стали будут постоянными, не зависящими от нагрузки, если напряжение на зажимах якоря и частота его вращения постоянны.

Ко второй составляющей относятся потери энергии на нагревание проводов обмоток возбуждения и якоря проходящими по ним токами, называемые потерями в меди, — $P_{обм}$.

Потери в обмотке якоря и в щеточных контактах зависят от тока в якоре, т. е. являются переменными — меняются при изменениях нагрузки.

Третья составляющая — механические потери $P_{\text{мех}}$, представляющие собой потери энергии на трение в подшипниках, трение вращающихся частей о воздух и щеток о коллектор. Эти потери зависят от частоты вращения якоря машины. Поэтому механические потери также постоянны, не зависят от нагрузки.

Кпд машины в процентах:

$$\eta = P_2 / P_1 \cdot 100\%,$$

где P_2 — полезная мощность; P_1 — потребляемая машиной мощность.

При работе машины генератором полезная мощность

$$P_2 = UI,$$

где U — напряжение на зажимах генератора; I — ток в нагрузке.

Потребляемая мощность

$$P_1 = P_2 + P_{\text{ст}} + P_{\text{обм}} + P_{\text{мех}} = UI + P_{\text{ст}} + P_{\text{обм}} + P_{\text{мех}}$$

и кпд

$$\eta = \frac{UI}{UI + P_{\text{ст}} + P_{\text{обм}} + P_{\text{мех}}} \cdot 100\%.$$

При работе машины двигателем потребляемая мощность

$$P_1 = UI,$$

где U — напряжение питающей сети; I — ток, потребляемый двигателем из сети.

Полезная мощность

$$P_2 = P_1 - P_{\text{ст}} - P_{\text{обм}} - P_{\text{мех}} = UI - P_{\text{ст}} - P_{\text{обм}} - P_{\text{мех}}$$

и кпд

$$\eta = \frac{UI - P_{\text{ст}} - P_{\text{обм}} - P_{\text{мех}}}{UI} \cdot 100\%.$$

Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип действия генератора постоянного тока и каково его устройство?
2. От чего зависит ЭДС машины постоянного тока?
3. Для чего устанавливают дополнительные полюсы?
4. Как протекает процесс самовозбуждения генератора?
5. Изобразите и поясните внешние характеристики генераторов.
6. Как осуществить реверсирование двигателя постоянного тока?
7. От чего зависит вращающий момент, частота вращения двигателя постоянного тока?
8. Изобразите и поясните характеристики двигателей постоянного тока.

Глава XI ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

§ 102. Электронная эмиссия

В электронных лампах прохождение тока связано с перемещением электронов в вакууме, который является непроводящей средой. Под вакуумом понимают такую высокую степень разрежения воздуха или газа, при которой движение электронов происходит без столкновения с молекулами газа. Источником электронов в электронных лампах служит металлический электрод — катод, с поверхности которого электроны выходят в окружающую среду. В металлах вокруг атомов движутся электроны, слабо связанные с ними. При нормальной температуре и при отсутствии внешнего электрического поля выхода электронов из катода нет вследствие недостаточности их кинетической энергии. Некоторая часть электронов, обладающая наибольшей энергией, выходит за пределы металла и образует электронный слой вокруг катода, который вместе с расположенным на поверхности катода слоем положительных ионов (атомов, лишившихся электронов) образует некоторую разность потенциалов, называемую потенциальным барьером. Эта разность потенциалов препятствует выходу электронов за пределы проводника.

Для выхода электронов из катода необходимо им сообщить энергию, равную работе по преодолению тормозящего действия электрического поля или потенциального барьера. Эта энергия называется работой выхода W_a , а ее отношение к заряду электрона — потенциалом выхода $\Phi_a = W_a/e$. В зависимости от способа сообщения дополнительной энергии электронам для выхода из катода различают следующие виды эмиссии: термоэлектронную, вторичную, под ударами тяжелых частиц, автоэлектронную, фотоэлектронную.

Термоэлектронной эмиссией называется явление выхода электронов из катода при его нагревании. При повышении температуры металла скорость движения электронов и их кинетическая энергия увеличиваются и число электронов, покидающих катод, возрастает.

Вторичной электронной эмиссией называется явление выхода вторичных электронов под действием ударов первичных электронов о поверхность тела. Летящие первичные электроны ударяются о поверхность проводника и проникают в его поверхностный слой, отдавая часть своей энергии вторичным электронам проводника. Если в результате столкновения вторичные электроны будут обладать энергией, большей работы выхода, то они выйдут за пределы проводника. Так как первичный электрон, обладающий значительной энергией, может отдать ее одному или нескольким электронам, то число вторичных электронов может быть больше первичных.

Электронной эмиссией под ударами тяжелых частиц называется явление выхода электронов под действием ударов ионов или возбужденных атомов (молекул) о поверхность проводника, т. е. этот вид эмиссии подобен вторичной электронной эмиссии.

Автоэлектронной эмиссией называется явление выхода электронов из катода под действием сильного электрического поля у его поверхности. Сила, действующая на электрон, находящийся в электрическом поле, пропорциональна заряду электрона и напряженности поля. Поэтому при достаточно большой напряженности электрического поля силы, действующие на электроны, становятся достаточными для преодоления потенциального барьера и выхода электронов из холодного катода.

Фотоэлектронной эмиссией называется явление выхода электронов под действием излучения, поглощаемого катодом, когда электроны катода получают дополнительную энергию для выхода от частиц света — фотонов. Лучистая энергия испускается и поглощается определенными порциями — квантами. Если энергия кванта больше работы выхода, то электрон может покинуть катод. Явление выхода электронов из катода под действием световой энергии называется фотопемом.

Все электроны, вылетающие из катода в единицу времени, удаляются от него внешним электрическим полем и образуют электрический ток эмиссии. С повышением температуры катода, увеличением энергии первичных электронов или тяжелых частиц, напряженности ускоряющего поля вблизи катода, светового потока ток эмиссии растет, так как увеличивается число эмиттированных (вылетевших из катода) электронов.

Если же внешнего ускоряющего поля нет и эмиттированные электроны не удаляются от катода, то они скапливаются вокруг него, образуя объемный отрицательный заряд (электронное облако), который создает вблизи катода тормозящее электрическое поле, препятствующее дальнейшему выходу электронов из катода.

§ 103. Электроды электровакуумных ламп

Электродами электровакуумных ламп являются катоды, аноды и сетки. Катод лампы, эмиттирующий электроны, характеризуется следующими параметрами: максимальной плотностью катодного тока, эффективностью, рабочей температурой и долговечностью.

Катодным током является электронный поток, направленный от катода к другим электродам. Для увеличения долговечности электронной лампы максимальный катодный ток обычно значительно меньше полного эмиссионного тока катода. Максимально допустимый катодный ток, приходящийся на единицу поверхности катода, эмиттирующего электроны, называется максимальной плотностью катодного тока, значение которой в современных электронных лампах $0,1—1$ А/см².

Эффективность катода (мА/Вт) показывает ток его эмиссии в миллиамперах на один ватт мощности, затраченной на разогрев катода: $H = I_{к. макс} / I_n U_n$, где $I_{к. макс}$ — максимальный ток эмиссии катода, I_n и U_n — ток и напряжение накала. Чем выше эффективность катода, тем больший ток эмиссии можно получать от него при меньшей затрате мощности в цепи накала. Эффективность катода составляет 2—100 мА/Вт.

Рабочая температура также определяет экономичность катода. Чем ниже рабочая температура катода, тем меньшая мощность требуется для его нагрева. Обычно рабочая температура 1000—2500°C.

Долговечность катода характеризуется временем, в течение которого катод может непрерывно работать, сохраняя свои важнейшие параметры в пределах установленных норм.

Термоэлектронные катоды (до 50 основных типов) по роду эмиттирующих поверхностей можно разделить на четыре группы: металлические, металлопленочные, полупроводниковые и сложные (металлополупроводниковые и металлокерамические).

Металлические (или однородные) катоды неактивированные и наименее экономичные, но хорошо работают в сложных температурных условиях, обладают высокой стойкостью при бомбардировке их ионами остаточных газов под воздействием сильных электрических полей. Они применяются в мощных лампах и в тех случаях, когда требуется высокая стабильность параметров катода во времени. Для изготовления металлических катодов применяют металлы с высокой температурой плавления, обладающие хорошими механическими свойствами: прочностью, ковкостью, тягучестью. Наиболее распространенным типом металлического катода является вольфрамовый (рабочая температура 2500°C, температура плавления 3395°C). Реже материалом катода служит тантал и ниобий.

Металлопленочные катоды представляют собой металлические катоды, поверхность которых покрыта одним или несколькими слоями вещества, имеющего положительный заряд, который создает электрическое поле, уменьшающее работу выхода электронов. Наиболее распространенными металлопленочными катодами являются карбидированный и бариевовольфрамовый. Такие катоды экономичнее металлических, но уступают им в отношении стабильности параметров и механической прочности.

Полупроводниковые катоды обладают высокой эффективностью и находят широкое применение. В таких катодах основание покрыто относительно толстым слоем активного вещества с электропроводностью электронного типа. К полупроводниковым катодам относятся оксидный и ториево-оксидный катоды.

Сложные катоды являются металлополупроводниковыми, выполненными на основе оксидных катодов, или металлокерамическими.

Оксидные катоды делятся на две группы: первая — катоды из составной пористой структуры, пропитанной активной массой, и вторая — оксидно-никелевые катоды, полученные на основе прессования карбонатов и никелевого порошка с последующей обработкой и активированием.

Металлокерамические катоды изготовляют из порошков вольфрама, окиси тория и керамики путем прессования и спекания при высокой температуре.

По своей конструкции катоды могут быть прямого накала и подогревными. В катодах прямого накала нить накала является эмиттирующей поверхностью. Они применяются в лампах большой мощности и выполняются из проволоки или ленты, которым придают различную форму: нить, решетка, Л- или М-образная, спиральная, беличье колесо. Катоды прямого накала имеют малую массу и, следовательно, малую теплоемкость, так что время их разогрева относительно мало и эффективность их выше, чем у подогревных катодов. Особенностью катодов прямого накала является их неэквипотенциальность, т. е. изменение потенциала по длине нити вследствие падения напряжения от проходящего по ней тока. При питании катодов прямого накала переменным током неэквипотенциальность приводит к появлению фона переменного тока в анодной цепи лампы. К недостаткам катодов прямого накала относится также малая площадь эмиттирующей поверхности и недостаточная жесткость конструкции. Катоды прямого накала выполняют металлическими и активированными торием или барием.

У подогревных катодов эмиттирующая поверхность и подогреватель отделены друг от друга и могут быть электрически не связаны между собой. Они имеют большую эмиттирующую поверхность и массу, что позволяет получить значительный эмиссионный ток и высокую тепловую инерцию. Однако время разогрева у них велико, а эффективность ниже, чем у катодов прямого накала. Потенциал подогревного катода одинаков по всей длине; фон переменного тока, обусловленный неэквипотенциальностью поверхности, здесь отсутствует. Подогреватели подогревательных катодов, изготовленные в виде спирали из вольфрама или сплава вольфрама с рением, помещают внутри катода. В качестве изолирующего материала применяют окись алюминия или окись бериллия.

Анод является коллектором электронов, которые отдают ему кинетическую энергию, полученную ими в ускоряющем поле лампы. При этом анод нагревается и, чтобы максимальная температура анода не превышала установленной для данной лампы величины, его охлаждают. Существует пять способов охлаждения анода: лучеиспускание через вакуум (анод находится внутри баллона), теплопроводность через массивный вывод (анод находится внутри стеклянного или металлокерамического баллона, на его вывод надет радиатор), воздушное, водяное, пароводяное. В первом и втором способах охлаждение естественное, в остальных трех — принудительное потоком воздуха, воды или пара.

Предельно допустимая температура анода выбирается в зависимости от его материала, типа катода, способа охлаждения, газовой выделенности из анода и материала баллона лампы.

Максимальная мощность, рассеиваемая на аноде, $P_a = I_a U_a$, где I_a и U_a — анодный ток и напряжение. Для того чтобы температура анода не превышала допустимую, необходимо $P_a < P_{a, \text{доп}}$, т. е. чтобы мощность, рассеиваемая на аноде P_a , была меньше допустимой $P_{a, \text{доп}}$.

для данной лампы. Допустимая мощность, рассеиваемая на аноде, устанавливается в зависимости от допустимой температуры анода, его материала, охлаждаемой поверхности, цвета этой поверхности и способа охлаждения.

Материалом анодов в лампах с небольшими нагрузками служит никель и алюминированное железо, в лампах с большими нагрузками при естественном охлаждении — молибден, тантал и титан, при искусственном охлаждении — медь. В ионных приборах, кроме того, используют графит.

Конструктивно анодам электронных ламп придают цилиндрическую, эллиптическую и коробчатую формы.

Сетки электровакуумных ламп изготавливают спиральными, рамочными и штампованными. Спиральные сетки навивают из проволоки различного диаметра на специальных автоматах и сваривают с траверсами (держателями) точечной сваркой. При изготовлении рамочных сеток на рамку натягивают проволоку очень малого диаметра (10 мкм); в результате жесткости таких сеток возможно достигать очень малых расстояний между электродами.

В электронных лампах число сеток может быть от одной до шести, и каждая из них имеет свое назначение и название. В зависимости от назначения сеток материалом для них может быть вольфрам, молибден, сплавы никеля и другие металлы.

Электроды электронных ламп помещаются в баллонах из стекла (натриевого, боросиликатного, свинцового, кварцевого), которое широко применяется благодаря своим физическим свойствам (малые теплопроводность и газовыделение) и низкой стоимости.

Применяют также комбинированные оболочки — металлостеклянные и металлокерамические. Для комбинированных оболочек используют сталь, медь, алюминий и титан, а керамические оболочки изготавливают из окиси алюминия, кремнезема, форстерита и стеатита. Недостатками стекла являются невысокая механическая прочность и термостойкость, вследствие чего стекло не выдерживает больших перепадов температур. Этим недостатком лишена металлокерамическая конструкция, имеющая малые диэлектрические потери, что очень важно при работе на СВЧ (сверхвысокие частоты).

Для поддержания в лампах высокого вакуума применяют геттер — поглотитель газов, выделяющихся из электродов при их нагреве или электронно-ионной бомбардировке. Наиболее распространенным геттером является барий, который, связывая остаточный газ, осаждается в виде окислов и чистого бария на стенках колбы, окрашивая ее в серовато-зеркальный цвет.

Колбы электронных ламп с электродами помещаются на цоколе. Схема соединения электродов со штырьками называется цоколевкой лампы и приводится в справочнике.

Миниатюрные и сверхминиатюрные лампы не имеют цоколя и выводы от электродов в них выполняют гибкими проводами, которые припаивают к соответствующим узлам схемы. При этом отсчет выводов ведется от цветной метки, поставленной на одном из выводов.

§ 104. Двухэлектродные электронные лампы (диоды)

Диод является простейшей электронной лампой, в колбе которой помещены два электрода: анод и катод. Выводы электродов присоединяются к штырькам, впрыснутым в пластмассовый цоколь лампы, или проходят непосредственно через стекло колбы. В высоковольтном диоде вывод от анода расположен в верхней части лампы (рис. 132), катод имеет форму нити.

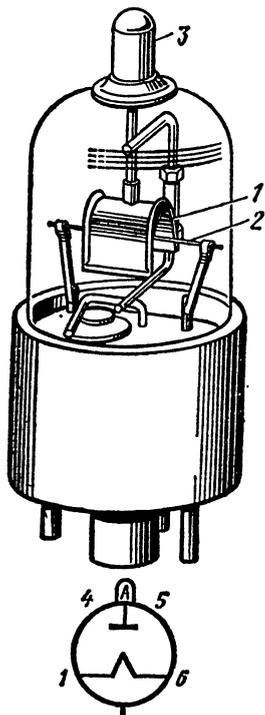


Рис. 132. Устройство диода ШС с цоколевкой:
1 — анод, 2 — катод, 3 — вывод анода

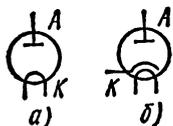


Рис. 133. Условное обозначение диодов на схемах:

а — с катодом прямого накала, б — с катодом косвенного накала; А — анод, К — катод

На рис. 133 показано условное обозначение диодов с катодами прямого накала и подогревным. Аноды ламп соединяют с одним штырьком цоколя, катод прямого накала — с двумя штырьками, катод косвенного накала (подогревный) — с тремя штырьками.

Катод или нити накала (подогреватели) питаются от батареи накала B_n с напряжением в несколько вольт или от накальной обмотки трансформатора. Нагретый катод эмиттирует электроны, которые устремляются к аноду, если между анодом и катодом существует ускоряющее электрическое поле, т. е. анод лампы соединен с положительным полюсом анодной батареи B_a , а катод — с отрицательным (рис. 134, а). Электроны, эмиттируемые катодом и достигающие анода, создают в цепи анодный ток I_a (диод открыт), а разность потенциалов между анодом и катодом лампы является анодным напряжением U_a . Направление анодного тока в лампе противоположно направлению движения электронов.

Если анод лампы соединить с отрицательным зажимом анодной батареи, а катод — с положительным (рис. 134, б), то электрическое поле между анодом и катодом лампы для электронов, покинувших катод, окажется тормозящим, и под действием этого поля электроны будут возвращаться на катод, т. е. тока в анодной цепи не будет (диод закрыт). В этом случае напряжение, приложенное к лампе, называется обратным анодным напряжением.

Таким образом, ток через диод проходит только в одном направлении — от анода к катоду, т. е. диод обладает односторонней проводимостью, свойственной электрическим вентилям.

При открытом диоде анодный ток увеличивается с ростом анодного напряжения. Зависимость анодного тока от анодного напряжения

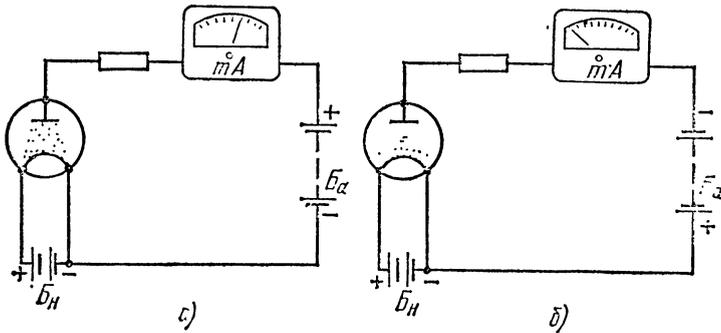


Рис. 134. Схема, поясняющая принцип действия диода:
а — диод открыт, б — диод закрыт

$I_a = f(U_a)$ при неизменном напряжении накала $U_n = \text{const}$ называется анодной или вольтамперной характеристикой диода (рис. 135). При анодном напряжении $U_a = 0$ через диод проходит незначительный начальный ток диода I_{a0} , который обусловлен электронами с запасом кинетической энергии, достаточной для достижения анода. Чтобы уменьшить этот ток до нуля, нужно приложить к лампе обратное запирающее напряжение $U_{\text{зап}}$ (порядка 1В) для создания тормозящего электрического поля.

С повышением прямого (положительного) анодного напряжения ток через лампу сначала растет медленно, а затем анодный ток возрастает быстрее, так как с повышением анодного напряжения уменьшается отрицательный объемный заряд, препятствующий движению электронов, и увеличивается напряженность ускоряющего электрического поля. Такой режим работы лампы называется режимом пространственного заряда. Если анодное напряжение достигает значения, при котором все эмиттированные электроны попадают на анод, то наступает режим насыщения, в котором ток насыщения $I_{\text{нас}}$ (кривая 1) при вольфрамовом катоде практически не изменяется, при бариевом увеличивается незначительно, при оксидном продолжает расти (кривая 3).

С увеличением напряжения накала ($U_{n2} > U_{n1}$) повышается температура катода и эмиссия электронов возрастает, вследствие чего увеличивается и ток насыщения диода (кривая 2).

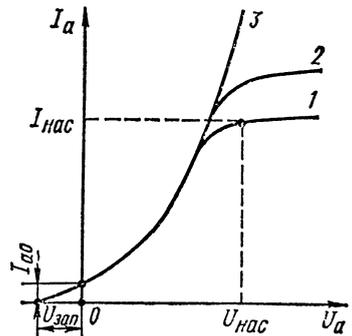


Рис. 135. Анодная характеристика диода

Основными параметрами лампы являются: крутизна характеристики, внутреннее сопротивление, допустимая мощность, выделяющаяся на аноде, допустимое обратное напряжение.

Крутизной характеристики называется отношение приращения анодного тока ΔI_a к соответствующему приращению анодного напряжения ΔU_a , т. е.

$$S = \Delta I_a / \Delta U_a,$$

которая у диодов разных типов составляет 1÷50 мА/В.

Внутренним или дифференциальным сопротивлением диода называется величина, определяемая отношением приращения анодного напряжения к приращению анодного тока и обратной крутизне характеристики, т. е.

$$R_i = \Delta U_a / \Delta I_a = 1/S,$$

которое у диодов разных типов составляет сотни омов.

Крутизна характеристики, так же как и дифференциальное сопротивление диода, на различных участках характеристики вследствие ее нелинейности неодинакова. Для определения S и R_i в рабочей точке на вольтамперной характеристике находят отрезок ΔI_a и соответствующий ему отрезок ΔU_a , отношение которых составляет крутизну характеристики и внутреннее сопротивление диода.

Выделяющаяся на аноде мощность $P_a = U_a I_a$ должна быть меньше допустимой мощности $P_{a, \text{доп}}$. Для каждой лампы указывается предельное значение мощности $P_{a, \text{доп}}$, рассеиваемой анодом.

Для каждой лампы указывается наибольшее допустимое обратное напряжение $U_{\text{обр}}$, которое может быть приложено к лампе в непроводящем направлении, не подвергая ее опасности пробоя. Если обратное напряжение превысит допустимое, то может развиваться самостоятельный разряд и наступить пробой.

К параметрам лампы относятся также номинальные напряжения и ток накала.

Конструктивно диоды могут быть одноанодными и двуханодными; последние представляют собой два диода в одном баллоне. Двуханодные диоды могут иметь один общий катод или два изолированных катода.

Диоды применяют для выпрямления переменного тока (кенотроны) и для преобразования высокочастотных колебаний (высокочастотные диоды) — для детектирования, модулирования, преобразования частот.

Система обозначения электровакуумных диодов (ГОСТ 13393—67) означает следующее: первая (цифра) — напряжение накала; вторая (буква) — тип лампы: Д — диод, Ц — кенотрон, Х — двойной диод; третья (цифра) — порядковый номер данного типа прибора; четвертая (буква) — конструктивное оформление: С — стеклянная оболочка, К — керамическая оболочка, П — стеклянная миниатюрная паль-

чиковая, Г, Б, Р — стеклянные сверхминиатюрные; Н — металло-керамическая. Отсутствие четвертого знака (буквы) означает металлическую оболочку.

§ 105. Трехэлектродные электронные лампы (триоды)

Триод, условное обозначение которого изображено на рис. 136, помимо анода и катода имеет третий электрод — сетку, которая управляет потоком электронов, т. е. током лампы. Управляющая сетка располагается между анодом и катодом вблизи последнего. Устройство двойного триода 6С3ЗС показано на рис. 137.

Разность потенциалов между сеткой и катодом называется сеточным напряжением. Если в диоде на электроны, вылетающие из раскаленного катода, действует объемный заряд и электрическое поле, образованное анодным напряжением U_a , то в триоде электрическое поле создается не только анодным, но и сеточным напряжением U_c . Так как сетка расположена ближе к катоду, то действие сеточного напряжения на электрическое поле между анодом и катодом более сильно, чем анодного.

При сеточном напряжении, равном нулю ($U_c=0$), электрическое

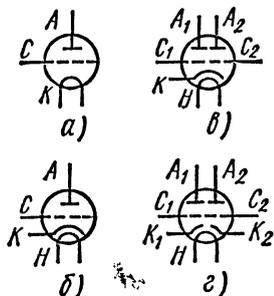


Рис. 136. Условное обозначение триода с катодом:

a — прямого накала, *b* — сподогревным катодом, *в* — двойного с подогревным катодом, *г* — с раздельными катодами; *A* — анод, *K* — катод, *C* — сетка

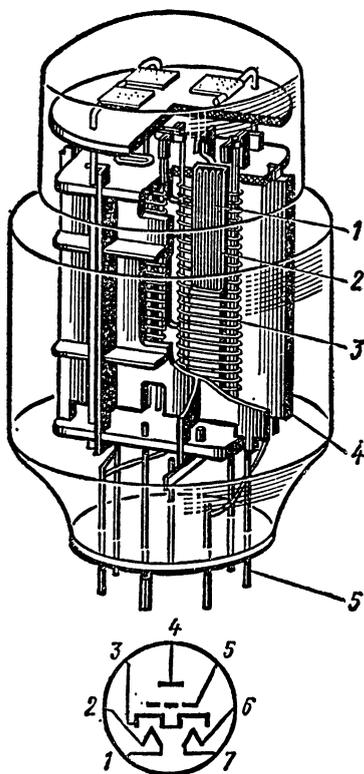


Рис. 137. Устройство двойного триода 6С3ЗС и его цоколевка:

1 — подогреватель, *2* — катод, *3* — сетка, *4* — анод, *5* — внешние выходы

поле определяется анодным напряжением. При положительном напряжении на сетке $U_c > 0$ на ускоряющее поле, созданное анодным напряжением, накладывается ускоряющее поле сетки так, что напряженность поля между сеткой и катодом возрастает и анодный ток

лампы увеличивается. Однако при $U_c > 0$ часть эмиттированных электронов попадает на сетку и образует в ее цепи сеточный ток I_c , который оказывает вредное влияние на режим работы лампы.

Если на сетке лампы будет отрицательный потенциал $U_c < 0$, то па ускоряющее поле, созданное анодным напряжением, между катодом и сеткой будет накладываться тормозящее поле сетки, уменьшающее напряженность поля и анодный ток лампы.

При неизменном анодном напряжении U_a результирующее поле

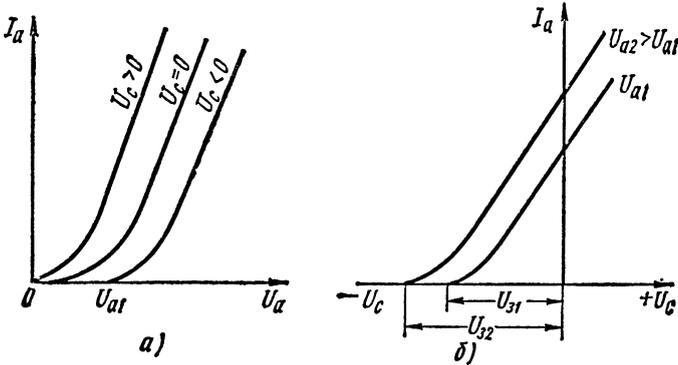


Рис. 138. Характеристики триода:
а — анодные, б — анодно-сеточные

между сеткой и катодом определяется потенциалом сетки и при небольшом отрицательном напряжении U_c результирующее поле останется еще ускоряющим и между анодом и катодом лампы будет проходить анодный ток. С увеличением отрицательного напряжения U_c результирующее поле между сеткой и катодом ослабеет и анодный ток уменьшается.

При некотором отрицательном напряжении сетки, называемом запирающим $U_c = U_3$, результирующее поле между сеткой и катодом становится тормозящим и анодный ток будет равным нулю, т. е. лампа запирается.

Зависимость анодного тока триода от анодного напряжения $I_a = f(U_a)$ при неизменном сеточном напряжении $U_c = \text{const}$, называемая анодной характеристикой, изображена на рис. 138, а. При нулевом значении сеточного напряжения $U_c = 0$ анодная характеристика триода практически не отличается от анодной характеристики диода. При положительном напряжении на сетке $U_c > 0$ анодный ток увеличится и характеристика расположится левее, причем тем выше, чем больше U_c . Если снять анодную характеристику при некотором отрицательном напряжении сетки $U_c < 0$, то она, сохраняя форму и наклон, расположится справа от характеристики, полученной при $U_c = 0$, т. е. сместится в область более высоких напряжений. При небольших анодных напряжениях лампа запирается отрицательным сеточным напряжением и отпирается, когда анодное напряжение достигнет значения U_{a1} ,

при котором ускоряющее анодное поле полностью компенсирует тормозящее поле сетки. Чем больше отрицательное напряжение сетки, тем больше анодное напряжение, при котором происходит отпирание лампы.

Совокупность анодных характеристик, снятых при различных сеточных напряжениях, называется семейством анодных характеристик. На рис. 138, б изображены анодно-сеточные характеристики, представляющие зависимость анодного тока от напряжения на сетке $I_a = f(U_c)$, снимаемые при неизменном анодном напряжении ($U_a = \text{const}$). Из характеристик видно, что чем больше анодное напряжение, тем большим должно быть отрицательное сеточное напряжение для запирания лампы.

К основным параметрам, характеризующим свойства триода, относятся крутизна, внутреннее сопротивление и коэффициент усиления.

Крутизной анодно-сеточной характеристики (крутизной триода) называется отношение приращения анодного тока ΔI_a к вызвавшему его приращению сеточного напряжения ΔU_c при неизменном анодном напряжении, т. е.

$$S = \Delta I_a / \Delta U_c$$

при $U_a = \text{const}$.

Крутизна триода характеризует способность сетки управлять анодным током.

Внутренним (или дифференциальным) сопротивлением триода при переменном токе называется отношение приращения анодного напряжения ΔU_a к вызванному им приращению анодного тока ΔI_a при неизменном сеточном напряжении, т. е.

$$R_i = \Delta U_a / \Delta I_a$$

при $U_c = \text{const}$. Внутреннее сопротивление характеризует влияние анодного напряжения на анодный ток лампы.

Коэффициентом усиления триода называется отношение приращения анодного напряжения ΔU_a к приращению сеточного напряжения ΔU_c , вызывающими одинаковое приращение анодного тока, т. е.

$$\mu = \Delta U_a / \Delta U_c$$

при $I_a = \text{const}$. Коэффициент усиления показывает, во сколько раз изменение сеточного напряжения действует на анодный ток сильнее, чем изменение анодного напряжения.

Между основными параметрами триода существует следующая зависимость:

$$SR_i = \Delta I_a / \Delta U_c \cdot \Delta U_a / \Delta I_a = \Delta U_a / \Delta U_c = \mu.$$

В триоде находятся три металлических электрода, между которыми существуют емкости: входная емкость сетка — катод $C_{ск}$, выходная емкость анод — катод $C_{ак}$ и проходная емкость анод — сетка $C_{ас}$. Эти емкости зависят от размеров и формы электродов, расстояния

между ними и т. д., обычно они малы (до $10\div 20$ пФ), но при высоких частотах емкостные сопротивления становятся небольшими и емкостные токи могут заметно возрасти. Например, входная емкость сетки — катод вызывает емкостный ток в цепи сетки и источника входного напряжения, что приводит к падению напряжения на внутреннем сопротивлении источника и уменьшает напряжение входа триода. Отрицательное влияние проходной емкости C_{ac} заключается в том, что из анодной цепи через эту емкость ответвляется ток в цепь сетки, т. е. выходное напряжение воздействует на вход лампы.

Таким образом, любое изменение анодного напряжения через емкость C_{ac} воздействует на цепь сетки, что может исказить усиливаемые сигналы и вызвать самовозбуждение усилителя.

§ 106. Четырехэлектродные электронные лампы (тетроды)

Недостатком триода является малый коэффициент усиления. Для его увеличения следует увеличить частоту управляющей сетки, но при этом уменьшается запирающее напряжение и анодно-сеточные характеристики смещаются вправо, где работа усилительной лампы становится невозможной из-за сеточных токов. Кроме того, в триоде относительно велика проходная емкость C_{ac} , ухудшающая работу усилителя.

Эти недостатки триода устраняются применением второй (экранной) сетки, располагаемой между анодом и управляющей сеткой. Такие электронные лампы с двумя сетками называются тетрами. Управляющая сетка в тетреде делается редкой с тем, чтобы запирающее напряжение было большим и анодно-сеточные характеристики располагались в левой части; экранирующая сетка делается густой и сильно экранирует катод и управляющую сетку от анодного поля. Поэтому влияние анодного напряжения на напряженность электрического поля вблизи катода оказывается слабым, так как основное поле его создается экранирующей сеткой, на которую подается положительное напряжение U_{c2} , несколько меньшее анодного.

Часть электронов, пролетая между витками экранирующей сетки, достигает анода и образует анодный ток; другая часть их попадает на экранирующую сетку и образует сеточный ток, который должен быть по возможности мал.

Ослабление поля между анодом и управляющей сеткой уменьшает проходную емкость между этими электродами C_{ac} во много раз, а ослабление анодного поля вблизи катода приводит к уменьшению влияния анодного напряжения на анодный ток, т. е. увеличивает коэффициент усиления, так как влияние потенциала управляющей сетки на анодный ток останется прежним. Поэтому коэффициент усиления и внутреннее сопротивление тетрода значительно больше, чем у триода, тогда как крутизна одинакова.

Существенным недостатком тетрода является возникновение потока электронов вторичной эмиссии от анода к экранирующей сетке. Электроны, летящие с большой скоростью к аноду, ударяют в него и выбивают из его поверхности вторичные электроны. Если при работе

лампы напряжение экранной сетки окажется выше анодного $U_{c2} > U_a$, то вторичные электроны будут притягиваться полем этой сетки, увеличивая ток экранной сетки и уменьшая анодный ток, несмотря на повышение анодного напряжения. Явление уменьшения анодного тока с ростом анодного напряжения, вызванное вторичной эмиссией, называется динатронным эффектом. При анодном напряжении, превышающем напряжение экранной сетки, динатронный эффект прекращается, вторичные электроны возвращаются на анод и анодный ток увеличивается с повышением анодного напряжения.

В лучевом тетроде, схема устройства которого и его условное обозначение показаны на рис. 139, *а* и *б*, динатронный эффект устраняется созданием между анодом *б* и экранирующей сеткой *з* отрицательного объем-

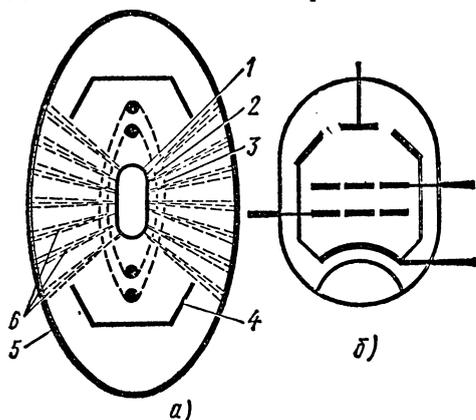


Рис. 139. Схема устройства лучевого тетрода (*а*) и его условное обозначение (*б*):

1 — катод, 2 — управляющая сетка, 3 — экранирующая сетка, 4 — экранирующие пластины, 5 — анод, 6 — электронные пучки

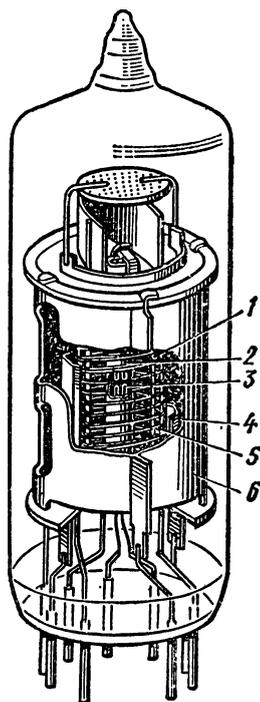


Рис. 140. Лучевой тетрод 6П1П:

1 — управляющая сетка, 2 — катод, 3 — подогреватель, 4 — экранирующие пластины, 5 — экранирующая сетка, 6 — анод

ного заряда, поле которого тормозит вторичные электроны и возвращает их обратно на анод. Катод *1* имеет плоскую форму, управляющая *2* и экранирующая *3* сетки выполнены с одинаковым шагом намотки. Между экранирующей сеткой *3* и анодом *5* с боковых сторон укреплены две лучеобразующие пластины *4*, соединенные с катодом *1* и имеющие отрицательный потенциал по отношению к аноду.

При таком устройстве электродов электроны, летящие от катода к аноду, формируются в плотные электронные пучки *б*, а лучеобразующие пластины препятствуют электронным лучам с боковых сторон и концентрируют их в области цилиндрической поверхности анода. Концентрация электронных потоков между анодом и экранирующей сеткой создает отрицательный объемный заряд, в сильной степени ослабляя динатронный эффект. На рис. 140 показан лучевой тетрод.

§ 107. Пятиэлектродная лампа (пентод), комбинированные и многосеточные лампы

В пентодах для устранения отрицательного эффекта вторичной эмиссии между анодом и экранирующей сеткой помещают еще одну защитную сетку, называемую защитной или антидинактронной.

Защитную сетку в пентодах соединяют с катодом и она находится под отрицательным потенциалом относительно анода, вследствие чего вторичные электроны отталкиваются защитной сеткой и до экранирующей сетки не долетают, так что динактронный эффект устраняется. Наличие третьей сетки в пентоде, условное обозначение которого показано на рис. 141, *а*, приводит к еще большему ослаблению влияния анодного напряжения на поле лампы и анодный ток. Поэтому коэффициент усиления μ и внутреннее сопротивление пентода R_i много больше, чем у тетрода.

Для уменьшения габаритов электронных устройств и для упрощения монтажа схем применяют комбинированные и многосеточные лампы. К первым относятся электронные лампы, у которых в одном баллоне находится несколько электронных систем, например двойной диод — триод (рис. 141, *б*), двойной триод (рис. 141, *в*) и др. На рис. 142 показан триод — пентод 6Ф1П с его цоколевкой.

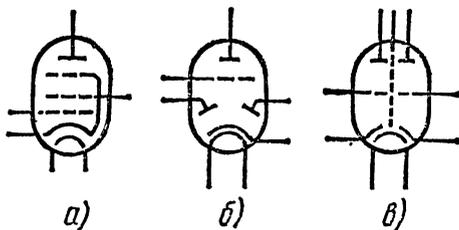


Рис. 141. Условное обозначение ламп:
а — пентода, *б* — двойного диода — триода, *в* — двойного триода

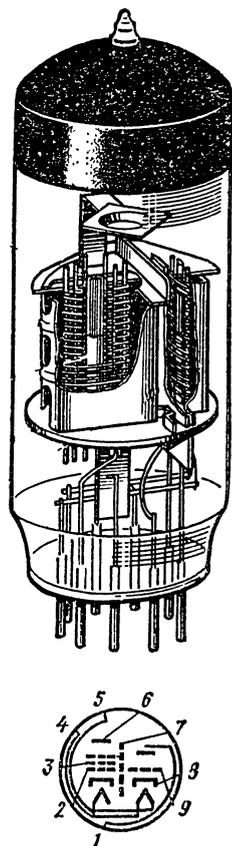


Рис. 142. Триод — пентод 6Ф1П и его цоколевка

Многосеточными называются электронные лампы, имеющие анод, катод и более трех сеток. У таких ламп несколько электродов могут выполнять одинаковые функции, например, анодный ток лампы может управляться двумя напряжениями, каждое из которых подается на свою сетку. Для уменьшения влияния между двумя управляющими сетками применяют дополнительную экранирующую сетку, располагаемую между управляющими. Электронные лампы типа тетрода с шестью электродами называются гексодами, типа пентода с семью электродами (пятью сетками) — гептодами, с восьмью электродами — октодами.

§ 108. Электронно-лучевые трубки

Электронно-лучевой трубкой называется электровакуумный прибор, в котором электронный поток формируется в электронный луч и используется для преобразования электрических сигналов в световые. Стекло́нный баллон электронно-лучевой трубки (рис. 143) имеет

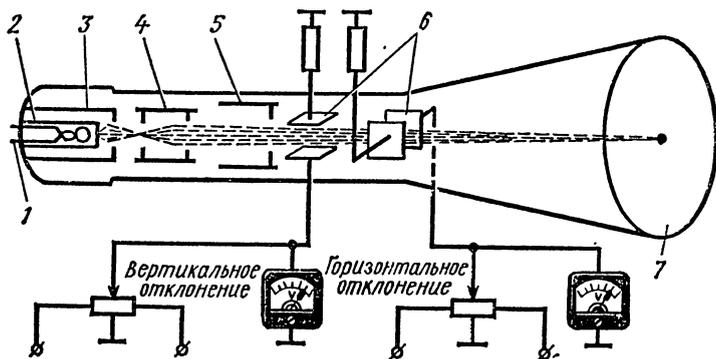


Рис. 143. Схема устройства электронно-лучевой трубки:
1 — подогреватель, 2 — катод, 3 — управляющий электрод, 4 и 5 — аноды, 6 — отклоняющие пластины, 7 — экран

форму колбы, в которой создан высокий вакуум. Электронный прожектор или электронная пушка состоит из подогревного катода 2, модулятора или управляющего электрода 3 и анодов 4 и 5, фокусирующих электронный луч на экран 7. Катод 2 представляет собой никелевый цилиндр, внутри которого расположен вольфрамовый подогреватель 1. На торцевой части катода с наружной стороны нанесен оксидный слой, что обеспечивает излучение электронов в одну сторону. Катод окружен управляющим электродом (модулятором) 3, представляющим собой металлический цилиндр с отверстием в торце, который предназначен для регулирования количества электронов в луче и для начального его формирования. Модулятор имеет некоторый отрицательный потенциал относительно катода, и электроны, вылетевшие из катода и направляющиеся в сторону модулятора, под действием электрического поля между катодом и модулятором изменяют направление своего движения, отклоняясь к оси луча.

При увеличении отрицательного потенциала модулятора часть электронов получает большее отклонение и не проходит через отверстие, т. е. изменением потенциала модулятора можно регулировать количество электронов в луче и яркость пятна на экране. Пройдя модулятор, электроны вновь могут отклоняться от оси луча. Для последующей фокусировки луча служат аноды 4 и 5. Оба анода цилиндрические с диафрагмой для ограничения поперечного сечения луча. Первый анод — фокусирующий, имеет положительный потенциал $200 \div 500$ В относительно катода, под действием сил электрического поля сжимает поток электронов, образуя тонкий электронный луч.

Второй анод 5 — ускоряющий, отстоящий на некотором расстоянии от первого вдоль оси трубки, находится под положительным потенциалом $1 \div 2$ кВ относительно катода. Между двумя анодами возникает электрическое поле, попав в которое электроны отклоняются к оси луча и получают ускорение в направлении движения к экрану 7.

Экран электронно-лучевой трубки 7 покрыт специальным составом (люминофором), который светится под действием быстро летящих электронов, т. е. когда сфокусированный луч попадает в какую-нибудь точку экрана эта точка начинает светиться. В качестве люминофоров для экранов электронно-лучевых трубок используют окиси цинка, бериллиевого цинка, смеси сернокислого цинка с сернокислым кадмием и др. Эти материалы обладают свойством послесвечения, т. е. продолжать светиться некоторое время после прекращения ударов электронов.

Электронный луч, попадая на экран, отдает ему энергию, часть которой преобразуется в световую в виде светящегося пятна диаметром менее одного миллиметра. Некоторая часть энергии электронного луча передается электронами экрана, вызывая вторичную эмиссию. Вторичные электроны улавливаются проводящим графитовым слоем (аквадагсом), покрывающим частично внутреннюю цилиндрическую и коническую части колбы и соединенным со вторым анодом.

Отклоняющие пластины 6 предназначены для перемещения электронного луча по экрану. Первая пара пластин предназначена для отклонения электронного луча в вертикальной плоскости и называется вертикально отклоняющей, а вторая пара пластин — для отклонения луча в горизонтальной плоскости и называется горизонтально отклоняющей.

Электрическое поле, возникающее между отклоняющими пластинами, воздействует на электронный луч и отклоняет его. Положим, что электронный луч совпадает с осью трубки и светящееся пятно находится в центре экрана. Если приложить к вертикальным отклоняющим пластинам постоянное напряжение, то между ними возникает электрическое поле, которое вызовет отклонение луча, и он встретится с экраном в другой точке — выше или ниже начальной. Под действием электрического поля отклоняющих пластин электроны и электронный луч смещаются в сторону пластины, имеющей положительный потенциал.

Изменяя напряжение на вертикальных отклоняющих пластинах и его полярность, можно менять угол и направление смещения луча, а точка свечения экрана будет перемещаться по вертикали. Аналогично изменение напряжения и его полярности на горизонтальных отклоняющих пластинах будет вызывать отклонение луча и свечение экрана по горизонтали.

Электронно-лучевые трубки с магнитным управлением имеют катод, модулятор и первый анод такого же устройства и назначения, что и трубки с электрическим управлением. Вторым анодом для ускорения электронов вдоль оси выполнен в виде слоя графита на внутренней поверхности цилиндрической и конической частей колбы. Фокусируется луч магнитным полем, возбуждаемым постоянным током специаль-

ной фокусирующей катушки. Под действием неоднородного магнитного поля внутри этой катушки электроны при своем движении отклоняются к оси трубки и фокусируются на экране. Фокусировка регулируется изменением тока фокусирующей катушки.

Отклоняющая система представляет собой две пары отклоняющих катушек, оси которых расположены взаимно перпендикулярно. Электронный луч в магнитном поле отклоняющих катушек изменяет свою траекторию под действием сил, направление которых определяется правилом левой руки.

По своему назначению электронно-лучевые трубки могут быть подразделены на три группы: осциллографические, предназначенные для исследования периодических и аperiodических процессов; индикаторные — для регистрации сигналов; приемные телевизионные — кинескопы, предназначенные для получения изображения на экране.

Обозначение электронно-лучевых трубок следующее: первый элемент (цифра) — число, округленно указывающее диаметр (диагональ) экрана в см; второй элемент (две буквы) — тип трубки: ЛО — осциллографическая трубка, кинескоп с электростатическим отклонением луча, ЛМ — трубка с электромагнитным отклонением луча; третий элемент (число) — порядковый номер типа прибора; четвертый элемент (буква) — тип экрана: цвет свечения, длительность и цвет послесвечения.

§ 109. Осциллограф

Электронно-лучевым (электронным) осциллографом называется прибор, предназначенный для наблюдения, записи, измерений и контроля периодически изменяющихся во времени электрических величин (напряжения, тока и др.). Основной частью осциллографа является электронно-лучевая трубка с электростатическим отклонением луча. Для получения кривой исследуемого напряжения u оно подводится к вертикально отклоняющим пластинам.

К горизонтально отклоняющим пластинам подводится напряжение развертки u_p , имеющее пилообразную форму (рис. 144, а), от специального генератора, смонтированного внутри осциллографа. Под действием пилообразного напряжения электронный луч перемещается горизон-

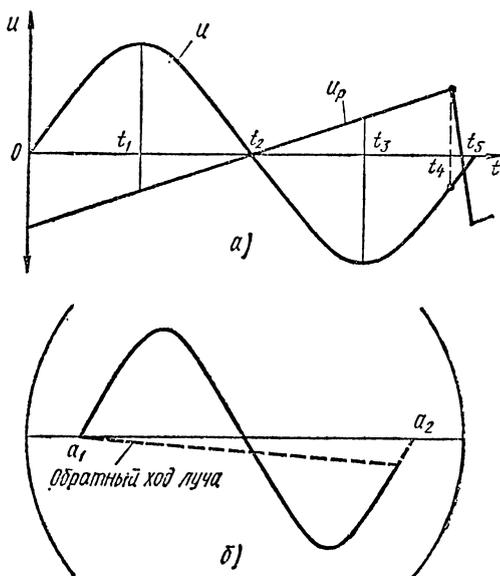


Рис. 144. Кривые исследуемого напряжения u и напряжения развертки u_p (а), изображение кривой напряжения на экране осциллографа (б)

тально по экрану и за время $0 \div t_4$ луч переместится слева направо, а за время $t_4 \div t_5$ быстро возвращается в исходное положение, после чего вновь движется слева направо и т. д. Период пилообразного напряжения развертки должен быть равен или больше в целое число раз периода изменения исследуемого напряжения. Если на вертикально отклоняющих пластинах напряжения нет, то луч по экрану будет перемещаться в виде горизонтальной линии и при идеальной пилообразной форме из точки a_2 возвращался бы в точку a_1 (рис. 144, б) на экране. При подаче на вертикально отклоняющие пластины исследуемого напряжения u электронный луч под влиянием электрического поля этих пластин будет отклоняться в вертикальном направлении на расстояние, пропорциональное мгновенному значению исследуемого напряжения.

Таким образом, при одновременной подаче на отклоняющие пластины напряжения развертки и исследуемого напряжения электронный луч вычертит на экране кривую изменения значений исследуемой величины, устойчивости которой способствует световая инерция экрана.

Если частота напряжений исследуемого сигнала и развертки различная и не кратная одна другой, то изображение будет перемещаться вдоль экрана трубки и для его остановки надо синхронизировать частоты этих напряжений.

Действительные кривые пилообразного напряжения развертки отличаются от идеальной пилы и спадающая часть кривой не вертикальна, а наклонна, что вызывает выпадение из кривой исследуемой величины некоторой ее части. Обратное движение луча из точки a_2 в точку a_1 происходит за отрезок времени $t_4 \div t_5$, т. е. значительно быстрее, чем прямое движение луча. Кроме того, обратный ход луча гасят и на экране обычно он не виден.

Электронные осциллографы также применяют для одновременного исследования двух периодически изменяющихся величин. Для этой цели используют либо двухлучевой осциллограф, либо однолучевой со специальным электронным коммутатором. Этот коммутатор производит поочередное включение то одной, то другой исследуемой величины, воздействующей на электронный луч электронно-лучевой трубки, в результате чего на ее экране одновременно высвечиваются две кривые исследуемых величин.

Контрольные вопросы

1. Что такое термоэлектронная эмиссия?
2. Для чего в электронной лампе помещают катод?
3. Какая электронная лампа называется дномод?
4. Как устроена трехэлектродная лампа?
5. Что называется крутизной характеристики триода?
6. Объясните устройство лучевого тетрода.
7. Каково назначение третьей (антидинаatronной) сетки?
8. Для чего служит электронно-лучевая трубка?
9. Как происходит отклонение электронного луча в электронно-лучевой трубке?
10. Как устроен электронный осциллограф?

Глава XII

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

§ 110. Электропроводность полупроводников

Полупроводниками называются материалы, занимающие промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Особенностью металлических проводников является наличие свободных электронов — носителей электрических зарядов. В диэлектриках свободных электронов нет и поэтому они не проводят тока.

В отличие от проводников полупроводники имеют не только электронную, но и «дырочную» проводимости, которые в сильной степени зависят от температуры, освещенности, сжатия, электрического поля и других факторов.

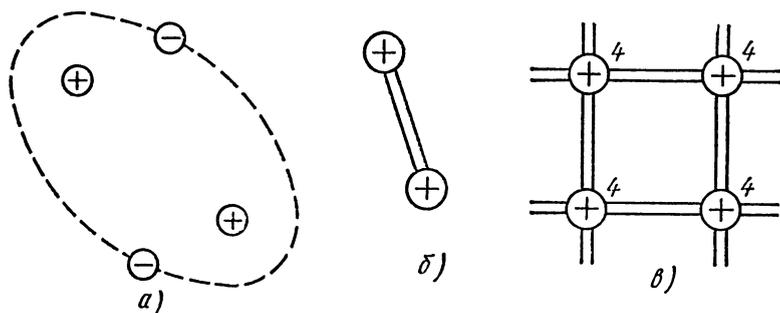


Рис. 145. Кристаллическая решетка полупроводника:
а — парноэлектронная (ковалентная) связь атомов, *б* — ее схематическое изображение, *в* — связи в кристаллической решетке германия

Химическую связь двух соседних атомов с образованием на одной орбите общей пары электронов (рис. 145, *а*) называют ковалентной или парноэлектронной и условно изображают двумя линиями, соединяющими электроны (рис. 145, *б*). Например, германий принадлежит к элементам четвертой группы периодической системы элементов Менделеева и имеет на внешней орбите четыре валентных электрона. Каждый атом в кристалле германия образует ковалентные связи с четырьмя соседними атомами (рис. 145, *в*).

При отсутствии примесей и температуре, близкой к абсолютному нулю, все валентные электроны атомов в кристалле германия взаимно связаны и свободных электронов нет, так что германий не обладает проводимостью. При повышении температуры или при облучении увеличивается энергия электронов, что приводит к частичному нарушению ковалентных связей и появлению свободных электронов. Уже при комнатной температуре под действием внешнего электрического поля сво-

бодные электроны перемещаются и в кристалле возникает электрический ток. Электропроводность, обусловленная перемещением свободных электронов, называется электронной проводимостью полупроводника, или *n*-проводимостью.

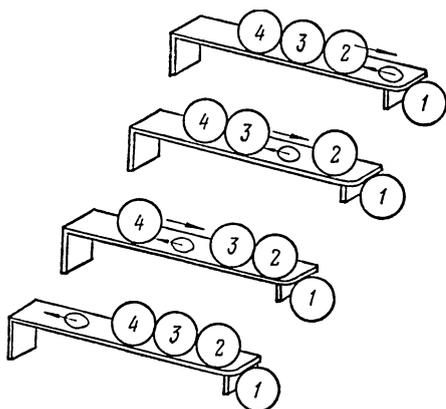


Рис. 146. Схема образования и заполнения дырок в кристалле германия

Схема образования и заполнения дырки условно показана на рис. 146. В установленной наклонно подставке имеется четыре отверстия (дырки), в которых расположено четыре шара (электрона). Если шар 1 сместится вправо, то он освободит отверстие (дырку) и упадет с подставки, а в отверстие, которое занимал этот шар, переместится шар 2. Свободное отверстие (дырку) шара 2 займет шар 3, а отверстие последнего — шар 4.

Под действием внешнего электрического поля дырки перемещаются в направлении сил поля, т. е. противоположно перемещению электронов.

Проводимость, возникающая в результате перемещения дырок, называется дырочной проводимостью, или *p*-проводимостью.

Таким образом, при электронной проводимости один свободный электрон проходит весь путь в кристалле, а при дырочной проводимости большое число электронов поочередно замещают друг друга в ковалентных связях и каждый из них проходит свой отрезок пути.

В кристалле чистого полупроводника при нарушении ковалентных связей возникает одинаковое число свободных электронов и дырок. Одновременно с этим происходит обратный процесс — рекомбинация, при которой свободные электроны заполняют дырки, образуя нормальные ковалентные связи. При определенной температуре число свободных электронов и дырок в единице объема полупроводника в среднем остается постоянным. При повышении температуры число свободных электронов и дырок сильно возрастает и проводимость германия значительно увеличивается. Электропроводность полупроводника при отсутствии в нем примесей называется его собственной электропроводностью.

Свойства полупроводника в сильной степени меняются при наличии в нем ничтожного количества примесей. Вводя в кристалл полупроводника атомы других элементов, можно получить в кристалле преобладание свободных электронов над дырками или, наоборот, преобладание

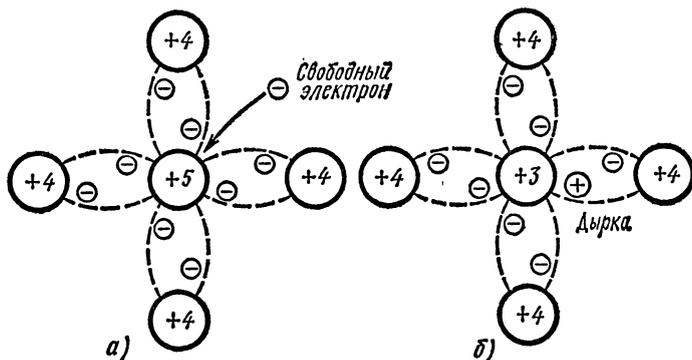


Рис. 147. Схема связи примесей с германием:

а — пятивалентной (донорной), *б* — трехвалентной (акцепторной)

дырок над свободными электронами. Например, при замещении в кристаллической решетке атома германия атомом пятивалентного вещества (мышьяка, сурьмы, фосфора) четыре электрона этого вещества образуют заполненные связи с соседними атомами германия, а пятый электрон окажется свободным (рис. 147, *а*), поэтому такая примесь увеличивает электронную проводимость (*n*-проводимость) и называется *д о н о р н о й*. При замещении атома германия атомом трехвалентного вещества (индий, галлий, алюминий) его электроны вступают в ковалентную связь с тремя соседними атомами германия, а связи с четвертым атомом германия будут отсутствовать, так как у индия нет четвертого электрона (рис. 147, *б*).

Восстановление всех ковалентных связей возможно, если недостающий четвертый электрон будет получен от ближайшего атома германия. Но в этом случае на месте электрона, покинувшего атом германия, появится дырка, которая может быть заполнена электроном из соседнего атома германия. Последовательное заполнение свободной связи эквивалентно движению дырок. Примеси с меньшим числом валентных электронов в атоме по сравнению с атомом данного полупроводника вызывают преобладание дырочной проводимости и называются *а к ц е п т о р н ы м и*.

Носители заряда, определяющие вид проводимости в примесном полупроводнике, называются *о с н о в н ы м и* (дырки в *p*-полупроводнике и электроны в *n*-полупроводнике), а носители заряда противоположного знака — *н е о с н о в н ы м и*.

§ 111. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковый диод (вентиль) представляет собой контактное соединение двух полупроводников, один из которых с электронной проводимостью (*n*-типа), а другой — с дырочной (*p*-типа, рис. 148, *а*).

Вследствие большой концентрации электронов в полупроводнике n будет происходить диффузия их из первого полупроводника во второй. Аналогично будет происходить диффузия дырок из второго полупроводника в первый n -типа. В тонком пограничном слое полупроводника n -типа возникает положительный заряд, а в пограничном слое полупроводника p -типа — отрицательный заряд. Между этими слоями возникает

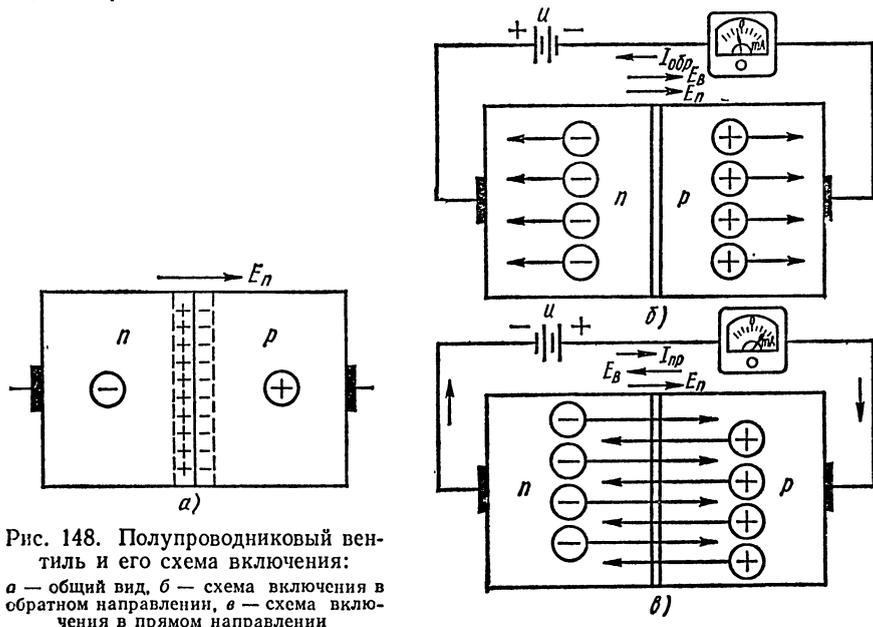


Рис. 148. Полупроводниковый вентиль и его схема включения:
 а — общий вид, б — схема включения в обратном направлении, в — схема включения в прямом направлении

разность потенциалов (потенциальный барьер) и образуется электрическое поле напряженностью E_n , которая препятствует диффузии электронов и дырок из одного полупроводника в другой. Таким образом, на границе двух полупроводников возникает тонкий слой, обедненный носителями зарядов (электронов и дырок) и обладающий большим сопротивлением. Этот слой называется **з а п и р а ю щ и м p - n -п е р е х о д о м**.

Вследствие теплового движения в электрическое поле p - n -перехода попадают неосновные носители зарядов (электроны из p -области и дырки из n -области). Движение неосновных носителей зарядов под действием сил поля p - n -перехода направлено встречно диффузионному току основных носителей и называется **д р е й ф о в ы м** или **т е п л о в ы м т о к о м**, зависящим в сильной степени от температуры. При отсутствии внешнего электрического поля дрейфовый ток уравновешивается диффузионным и суммарный ток через p - n -переход равен нулю.

Соединив положительный зажим источника питания с металлическим электродом полупроводника n -типа, а отрицательный зажим с электродом полупроводника p -типа, получим внешнее электрическое поле E_B , направленное согласно с полем p - n -перехода E_n , усиливающее его (рис. 148, б). Такое поле еще больше будет препятствовать про-

хождению основных носителей зарядов через запирающий слой и через диод пройдет малый обратный ток $I_{обр}$, обусловленный неосновными носителями заряда. Обратный ток диода в значительной мере зависит от температуры, увеличиваясь с ее повышением.

При изменении полярности источника питания (рис. 148, в) внешнее электрическое поле E_v окажется направленным встречно полю p - n -перехода E_n и под действием этого поля электроны и дырки начнут двигаться навстречу друг другу и число основных носителей заряда в переходном слое возрастет, уменьшая потенциальный барьер и сопротивление переходного слоя.

Таким образом, в цепи устанавливается прямой ток $I_{пр}$, который будет значительным даже при относительно небольшом напряжении источника питания U .

На рис. 149 показана вольт-амперная характеристика германиевого диода и его условное обозначение. Для большей наглядности прямая ветвь (правая часть графика) и обратная ветвь (левая часть графика) характеристики изображены в различных масштабах. Характеристика показывает, что при небольшом прямом напряжении $U_{пр} = 1В$ на зажимах диода в его цепи проходит относительно большой ток, а при значительных обратных напряжениях $U_{обр}$ ток $I_{обр}$ ничтожно мал.

Таким образом, полупроводниковый диод обладает односторонней проводимостью, т. е. является электрическим вентиляем. Промышленность производит электрические вентиля германиевые, кремниевые, селеновые и меднозакисные. Германиевые и кремниевые вентиля изготовляют двух типов: точечные и плоскостные. У точечного германиевого диода (рис. 150, а) помещен кристалл германия 5 с электронной проводимостью, в который острием входит контактный пружинящий вывод анода 3. Под контактным острием в результате специальной термической обработки создается область с дырочной проводимостью. В плоскостном германиевом диоде (рис. 150, б) на пластину германия 5 с электронной проводимостью накладывается таблетка из индия, которая в процессе изготовления диода нагревается до $500^{\circ}C$ и плавится так, что ее атомы диффундируют в германий, образуя область с дырочной проводимостью.

На границе двух областей (с электронной и дырочной проводимостью) появляется запирающий p - n -переход.

Как в точечном, так и в плоскостном диоде германий 5 припоем 4 укреплен на кристаллодержателе 6, к которому приварен вывод катода

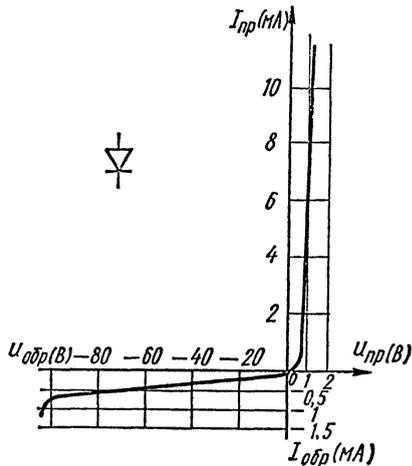


Рис. 149. Вольт-амперная характеристика германиевого диода и его условное обозначение

(нижний) 7. Вывод анода 3 также припоем 4 укрепляется в области с дырочной проводимостью и выводится наружу в верхней части диода. Металлический корпус 2 сварен с кристаллодержателем 6 и стеклянным изолятором 1.

Кремниевые диоды отличаются от германиевых не только материалом полупроводника, но и некоторыми преимуществами, а именно:

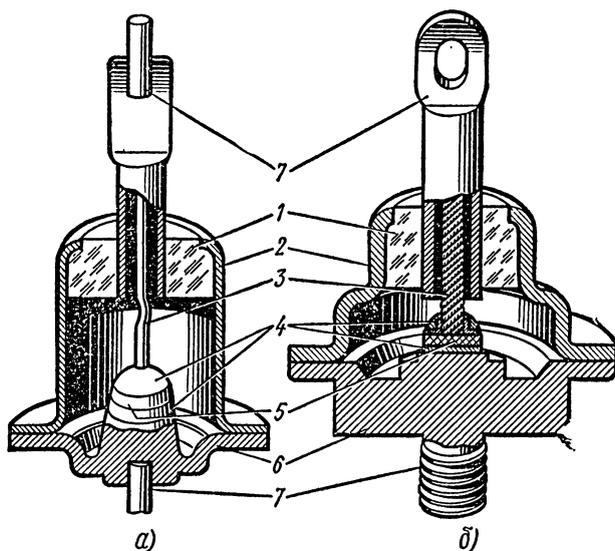


Рис. 150. Конструкция германиевого диода:

a — точечного, *б* — плоскостного; 1 — изолятор, 2 — корпус, 3 — вывод анода, 4 — припой, 5 — кристалл, 6 — кристаллодержатель, 7 — внешние выводы

более высокой предельной температурой, много меньшим обратным током, более высоким пробивным напряжением. Однако сопротивление кремниевого вентиля в прямом направлении значительно больше, чем германиевого.

Селеновый вентиль состоит из алюминиевого диска, с одной стороны покрытого слоем кристаллического селена, обладающего дырочной проводимостью, который служит одним электродом. Другим электродом является нанесенный на селен слой сплава кадмия и олова, при диффузии из которого атомов кадмия в селен образуется слой, обладающий электронной проводимостью. Селеновые вентили имеют значительно меньшие обратные напряжения (до 60 В) и плотности тока ($0,1 \div 0,2$ А/см²), чем германиевые и кремниевые, так что их габариты и масса значительно больше.

Однако характеристики селеновых вентилях более стабильны, что позволяет соединять их последовательно и параллельно для увеличения обратных напряжений и прямых токов. Кроме того, селеновые вентили обладают свойством самовосстановления, которое сводится к следующему: если через пробитую шайбу пропустить большой ток, то

селен нагревается и плавится, закрывая место пробоя и восстанавливая вентиляющее свойство диода.

Меднозакисный вентиль состоит из медного диска со слоем окиси меди, к которому прилегает для получения хорошего контакта свинцовый диск с латунным радиатором большого диаметра. Слой окиси меди образуется при термической обработке меди в атмосфере кислорода. Наружный слой окиси меди, полученный при избытке кислорода, обладает дырочной проводимостью, а слой окиси, полученный при недостатке кислорода, — электронной проводимостью. Между этими двумя слоями окиси меди возникает *p-n*-переход.

Меднозакисные вентили имеют низкие обратные напряжения (10 В) и плотности тока ($0,1 \text{ А/см}^2$) и в преобразовательных устройствах не используются. Их применение ограничено измерительными приборами в силу стабильности их характеристик.

§ 112. Транзисторы

Транзистором называется полупроводниковый прибор с двумя *p-n*-переходами, предназначенный для усиления и генерирования электрических колебаний и представляющий собой пластину кремния или германия, состоящую из трех областей. Две крайние области всегда обладают одинаковым типом проводимости, а средняя — противоположной проводимостью. Транзисторы, у которых крайние области обладают электронной проводимостью, а средняя — дырочной проводимостью, называются транзисторами *n-p-n*-типа (рис. 151, а); транзисторы, у которых крайние области обладают дырочной, а средняя электронной проводимостями — транзисторами *p-n-p*-типа (рис. 151, б). Физические процессы, происходящие в транзисторах двух типов, аналогичны и различие между ними заключается в том, что полярности включения источников питания их противоположны, а также в том, что если в транзисторе *n-p-n*-типа электрический ток создается в основном электронами, то в транзисторе *p-n-p*-типа — дырками. Смежные области, отделенные друг от друга *p-n*-переходами, называются эмиттером Э, базой Б и коллектором К.

Э м и т е р является областью, испускающей (эмиттирующей) носители зарядов электронов в транзисторе *n-p-n*-типа и дырок в транзисторе *p-n-p*-типа, к о л л е к т о р — область, собирающая носители зарядов, б а з а — средняя область, основание.

В условиях работы транзистора к левому *p-n*-переходу прикладывается напряжение эмиттер — база $U_э$ в прямом направлении, а к правому *p-n*-переходу — напряжение база — коллектор $U_к$ — в обратном. Под действием электрического поля большая часть носителей зарядов из левой области (эмиттера), преодолевая *p-n*-переход, переходит в очень узкую среднюю область (базу). Далее большая часть носителей зарядов продолжает двигаться ко второму переходу и, приближаясь к нему, попадает в электрическое поле, созданное внешним источником $U_к$. Под влиянием этого поля носители зарядов втягиваются в правую область (коллектор), увеличивая ток в цепи батареи $U_к$.

Если увеличить напряжение $U_э$, то возрастет количество носителей

зарядов, перешедших из эмиттера в базу, т. е. увеличится ток эмиттера на некоторую величину $\Delta I_э$. При этом также увеличится ток коллектора на величину $\Delta I_к$.

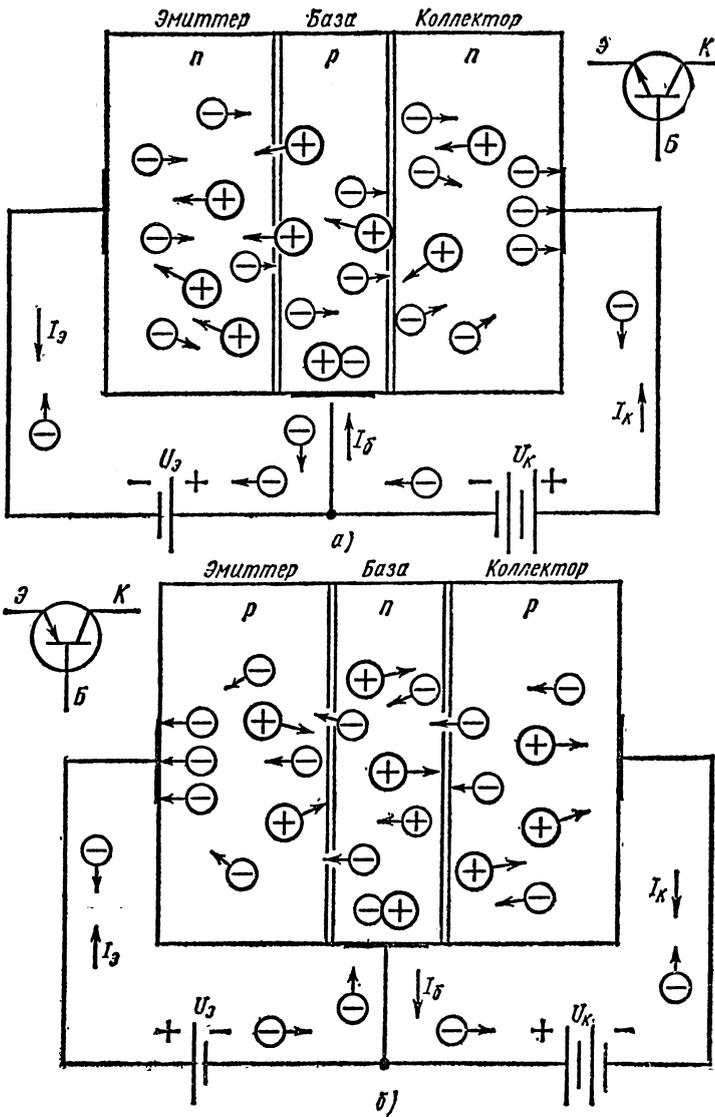


Рис. 151. Принцип работы и условное обозначение транзистора:
а — n-p-n, б — p-n-p

В базе незначительная часть носителей зарядов, перешедших из эмиттера, рекомбинирует со свободными носителями зарядов противоположной полярности, убыль которых пополняется новыми носите-

лями зарядов из внешней цепи, образующими ток базы I_B . Таким образом, ток коллектора $I_K = I_E - I_B$ окажется меньше тока эмиттера, незначительно отличаясь от последнего. Отношение $\alpha = \Delta I_K / \Delta I_E$ при $U_K = \text{const}$ называется коэффициентом усиления по току и обычно имеет значение $\alpha = 0,9 \div 0,995$.

Если цепь эмиттер — база разомкнута и ток в ней равен нулю

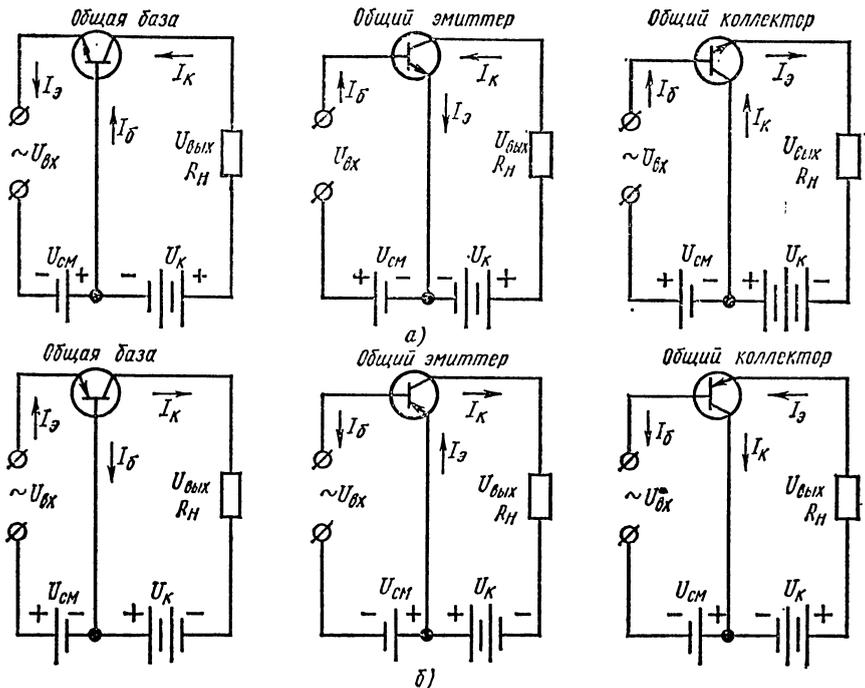


Рис. 152. Схемы включения с общей базой, общим эмиттером, общим коллектором транзисторов:

а — n-p-n, б — p-n-p

$I_E = 0$, а между коллектором и базой приложено напряжение U_K , то в цепи коллектора будет проходить небольшой обратный (тепловой) ток $I_{к0}$, обусловленный неосновными носителями зарядов. Этот ток в сильной степени зависит от температуры и является одним из параметров транзистора (меньшее его значение соответствует лучшему качеству транзистора).

Так как левый (эмиттерный) p-n-переход находится под прямым напряжением, то он обладает малым сопротивлением. На правый же (коллекторный) p-n-переход воздействует обратное напряжение и он имеет большое сопротивление. Поэтому напряжение, прикладываемое к эмиттеру, весьма мало (десятые доли вольта), а напряжение, подаваемое на коллектор, может быть достаточно большим (до нескольких десятков вольт). Изменение тока в цепи эмиттера, вызванное малым напряжением U_E , создает примерно такое же изменение тока в цепи кол-

лктора, где действует значительно большее напряжение U_k , в результате чего транзистор осуществляет усиление мощности.

При работе транзистора в качестве усилителя электрических колебаний входное переменное напряжение $U_{вх}$ (сигнал, подлежащий усилению) подают последовательно с источником постоянного напряжения смещения $U_{см}$ между эмиттером и базой, а выходное напряжение $U_{вых}$ (усиленный сигнал) снимается с нагрузочного резистора R_n .

Возможны три схемы включения транзисторов *n-p-n*-типа (рис. 152, а) и *p-n-p*-типа (рис. 152, б): с общей базой *ОБ*, с общим эмиттером *ОЭ* и с общим коллектором *ОК*. Название схемы показывает, какой электрод транзистора является общим для входной и выходной цепей. Схемы включения транзисторов отличаются своими свойствами, но принцип усиления колебаний остается одинаковым.

В схеме с общей базой положительное приращение напряжения на входе $\Delta U_{вх}$ вызывает увеличение тока эмиттера $I_э$, что приводит к увеличению как тока коллектора I_k , так и напряжения выхода $\Delta U_{вых}$, причем $\Delta U_{вых} \gg \Delta U_{вх}$.

В схеме с *ОБ* источник входного напряжения включен в цепь эмиттер — база, а нагрузка и источник питания — в цепь коллектор — база. Входное сопротивление схемы с *ОБ* мало (несколько омов или десятков омов), так как эмиттерный переход включен в прямом направлении. Выходное сопротивление схемы, наоборот, велико (сотни килоомов), так как коллекторный переход включен в обратном направлении. Малое входное сопротивление схемы с *ОБ* является существенным ее недостатком, ограничивающим применение ее в усилителях. Через источник входного сигнала в этой схеме проходит весь ток эмиттера, и усиления по току не происходит (коэффициент усиления по току $\alpha < 1$). Усиление по напряжению и по мощности в этой схеме может достигать нескольких сотен.

В схеме с общим эмиттером *ОЭ* источник входного напряжения включен в цепь эмиттер — база, а сопротивление нагрузки R_n и источник питания — в цепь эмиттер — коллектор, так что эмиттер является общим электродом для входной и выходной цепей. Входное сопротивление схемы с *ОЭ* больше, чем у схемы с *ОБ*, так как входным током в ней является ток базы, который много меньше тока эмиттера и тока коллектора. Это сопротивление составляет сотни омов. Выходное сопротивление схемы с *ОЭ* велико и может составлять до ста килоомов. Коэффициент усиления по току β в этой схеме определяется как отношение приращения тока коллектора ΔI_k к приращению тока базы $\Delta I_б$ при постоянном напряжении на коллекторе, т. е. $\beta = \Delta I_k / \Delta I_б$ при $U_k = \text{const}$ и может иметь значения $\beta = 10 \div 200$ для различных транзисторов. Учитывая равенства

$$I_э = I_k + I_б \text{ и } \alpha = \Delta I_k / \Delta I_э,$$

получим

$$\beta = \Delta I_k / (\Delta I_э - \Delta I_k) = \frac{\Delta I_k / \Delta I_э}{1 - \Delta I_k / \Delta I_э} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}.$$

Коэффициент усиления по напряжению K_n для схемы с *ОЭ* того же

порядка, что и для схемы с *ОБ*. Коэффициент усиления по мощности $K_p = K_i K_u$ во много раз больше, чем в схеме с *ОБ*.

В схеме с общим эмиттером *ОЭ* при усилении входного напряжения происходит поворот фазы выходного напряжения на половину периода, т. е. на 180° , как это видно из схемы: положительные приращения входного напряжения вызывают отрицательное приращение выходного и наоборот.

В схеме с общим коллектором *ОК* источник входного напряжения включается в цепь базы, а источник питания и сопротивление нагрузки — в цепь эмиттера. Входным током является ток базы, а выходным — ток эмиттера. Коэффициент усиления по току для этой схемы

$$K_i = \Delta I_\varepsilon / \Delta I_\delta = \Delta I_\varepsilon / (\Delta I_\varepsilon - \Delta I_k) = 1 / (1 - \alpha).$$

Входное сопротивление схемы с *ОК* велико (десятки килоомов), а выходное сопротивление мало (до $1 \div 2$ кОм). Коэффициент усиления по напряжению схемы с общим коллектором *ОК* $K_u = 0,9 \div 0,95$, т. е. близок к единице, и эту схему часто называют эмиттерным повторителем. Схема с общим коллектором *ОК* используется для согласования отдельных каскадов усиления, источника сигнала или нагрузки с усилителем.

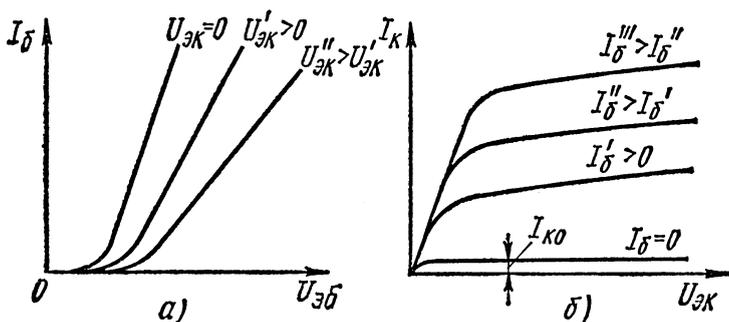


Рис. 153. Статические характеристики транзистора типа *p-n-p*, включенного по схеме с общим эмиттером:

a — входные, *б* — выходные

Характеристиками транзистора называются зависимости между токами и напряжениями во входной и выходной цепях. При разных схемах включения транзистора входные и выходные цепи различны, следовательно, и характеристики представляют собой зависимости различных величин для каждой схемы включения.

Так, для схемы с общим эмиттером *ОЭ* входной цепью является цепь базы и входная характеристика отражает зависимость тока базы от напряжения эмиттер — база при постоянном напряжении между эмиттером и коллектором, т. е. $I_\delta = f(U_{\varepsilon\delta})$ при $U_{\varepsilon k} = \text{const}$. Выходной цепью для этой схемы является цепь коллектора и выходной характеристикой — зависимость тока коллектора от напряжения эмиттер — коллектор при неизменном токе базы, т. е. $I_k = f(U_{\varepsilon k})$ при $I_\delta = \text{const}$.

На рис. 153, *a* и *б* показан примерный вид входных и выходных характеристик транзистора типа *p-n-p*. При малых значениях напря-

жения между эмиттером и базой ($U_{эб}$) ток базы растет медленно из-за большого сопротивления $p-n$ -перехода, которое с увеличением тока уменьшается. С увеличением коллекторного напряжения $U_{эк}$ входные характеристики смещаются вправо, т. е. с увеличением $U_{эк}$ необходимо повысить напряжение $U_{эб}$, для того чтобы ток базы остался

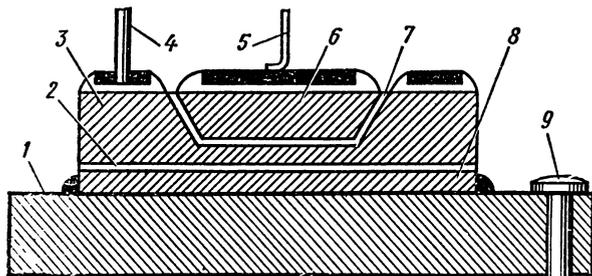


Рис. 154. Устройство плоскостного германиевого транзистора типа $p-n-p$:

1 — кристаллодержатель, 2 — коллекторный переход, 3 — база, 4 — вывод базы, 5 — вывод эмиттера, 6 — эмиттер, 7 — эмиттерный переход, 8 — коллектор, 9 — вывод коллектора

рис. 154. Базой является пластина 3 из кристаллического германия с электронной проводимостью. С двух сторон в пластину вплавлены индиевые электроды, служащие эмиттером 6 и коллектором 8. При плавлении индия между каждым из этих электродов и германиевой пластиной — базой образуются области с дырочной проводимостью и создаются эмиттерный 7 и коллекторный 2 $p-n$ -переходы. Коллектор 8 крепится на кристаллодержателе 1, от которого наружу проходит вывод коллектора 9. Выводы от эмиттера 5 и базы 4 изолированы от корпуса стеклянными проходными изоляторами. Транзистор помещается в металлический корпус.

Транзисторы по сравнению с электронными лампами имеют следующие преимущества: большую механическую прочность и долговечность, постоянную готовность к работе, малые габариты и массу, низкое напряжение питания и высокий кпд; кроме того, отсутствует цепь накала и, следовательно, упрощена схема и нет потребления мощности для разогрева катода.

К недостаткам транзисторов относится зависимость режима работы его от температуры окружающей среды, небольшая выходная мощность, чувствительность к перегрузкам, разброс параметров, вследствие которого отдельные транзисторы одного типа значительно отличаются друг от друга по своим параметрам, большое различие между входными и выходными сопротивлениями.

§ 113. Тиристоры

Четырехслойный кремниевый вентиль с двумя электродами (анодом и катодом) называется д и н и с т о р о м. Если кроме анода и катода имеется третий (управляющий) электрод, то вентиль стано-

неизменным. Выходные характеристики показывают, что в рабочей области напряжение $U_{эк}$ незначительно влияет на коллекторный ток $I_{к}$, так как в основном он зависит от количества дырок, инжектируемых в базу, т. е. от тока эмиттера.

Устройство плоскостного германиевого транзистора $p-n-p$ -типа показано на

вится управляемым и называется тиристором. Тиристор, а также диодистор имеют четыре слоя — $p-n-p-n$ (рис. 155), между которыми находятся три $p-n$ -перехода Π_1, Π_2, Π_3 . У тиристора от средней области p имеется вывод — управляющий электрод $У$. При отключенном управляющем электроде тиристор превращается в диодистор. Если между анодом и катодом вентиля приложено небольшое постоянное напряжение в прямом направлении, то переходы Π_1 и Π_3 будут открытыми и их сопротивление мало. Переход Π_2 будет включен в обратном (непроводящем) направлении и его сопротивление велико, так что все приложенное к тиристорному напряжению будет практически на переходе Π_2 , а ток в цепи мал. При повышении напряжения U на тиристоре ток в цепи увеличивается незначительно, так как ограничивается большим сопротивлением перехода Π_2 и вольтамперная характеристика тиристора будет подобна обратной ветви характеристики диода (кривая Oa на рис. 156). Если напряжение достигнет некоторого определенного значения, называемого напряжением переключения $U_{пер}$, то в переходе Π_2 напряженность электрического поля становится достаточной для ионизации и образования новых свободных носителей зарядов (электронов и дырок), его сопротивление резко уменьшается и тиристор открывается. Напряжение на открытом тиристоре (участок $бв$ вольтамперной характеристики) мало (порядка 1–2 В) и почти неизменно, так что ток в цепи ограничивается сопротивлением внешней нагрузки.

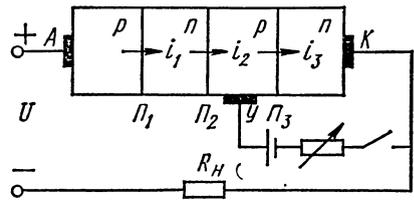


Рис. 155. Схема устройства тиристора

Наибольший ток тиристора лимитируется предельно допустимой мощностью, рассеиваемой им. Если уменьшать ток через открытый тиристор, то он будет оставаться открытым до тех пор, пока ток в тиристоре достаточен для поддержания процесса образования носителей зарядов в переходе Π_2 . При токе, меньше определенного значения, называемого током удержания $I_{уд}$, тиристор закрывается, т. е. возвращается в непроводящее состояние.

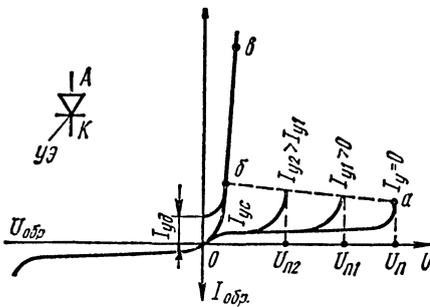


Рис. 156. Вольтамперная характеристика тиристора и его условные обозначение

от постороннего источника, то в переходе Π_3 возникнет ток управления и появятся дополнительные носители зарядов, вследствие чего уменьшится напряжение переключения этого перехода и тиристор открывается при меньшем напряжении $U_{п1}$. Чем больше ток управления I_y , тем больше дополнительных зарядов в переходе Π_3 и меньше напряжение переключения тиристора. При определенном значении

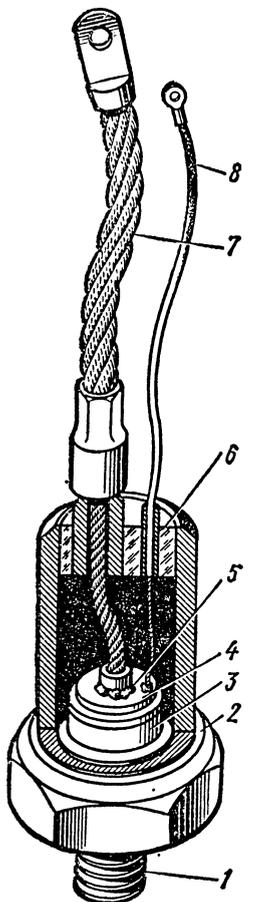


Рис. 157. Тиристор:

1 — вывод катода, 2 — корпус, 3 — кристаллодержатель, 4 — кристаллическая структура, 5 — припой, 6 — изолятор, 7 — вывод анода, 8 — вывод управляющего электрода

тока управления, называемом током спрямления I_{yc} тиристор будет работать как неуправляемый вентиль, т. е. будет открыт при любом положительном напряжении на его аноде. Таким образом, тиристор открывается как при подаче на его анод напряжения переключения, так и при включении тока управления достаточной величины I_{yc} . Так как управляющий электрод после открытия тиристора перестает оказывать влияние на его работу, то в цепи управляющего электрода проходит кратковременный импульс тока прямоугольной формы и длительностью примерно 10 мкс.

При подаче на зажимы тиристора обратного напряжения $U_{обр}$ он будет закрыт обратными переходами Π_1 и Π_3 независимо от управляющего тока и его вольт-амперная характеристика практически не отличается от обратной ветви вольт-амперной характеристики неуправляемого вентиля (см. рис. 160).

Тиристоры имеют два устойчивых состояния: при закрытом тиристоре его сопротивление очень велико ($R \sim \infty$), при открытом — мало ($R \sim 0$). Поэтому тиристоры находят применение как бесконтактные переключатели в инверторах, регулируемых выпрямителях, в схемах защиты и т. д.

Конструкция мощного тиристора показана на рис. 157. Четырехслойная кристаллическая структура 4, укрепленная на кристаллодержателе 3, помещена в металлическом корпусе 2, в нижней части которого находится резьбовой вывод катода 1. К верхнему p -слою припоем 5 крепится плетеный вывод анода 7. В среднюю p -область вводится вывод управляющего электрода 8. Выводы анода и управляющего электрода укрепляют в корпусе изолятором 6.

Контрольные вопросы

1. Объясните строение атомов германия.
2. В чем состоит различие между электронной и дырочной проводимостью?
3. Каково устройство германиевого вентиля?
4. В чем заключается принцип работы транзистора?
5. Каково устройство плоскостного германиевого транзистора?
6. Перечислите схемы включения транзисторов.
7. Изобразите характеристики транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.
8. Каково устройство тиристора?
9. Изобразите вольт-амперную характеристику тиристора.

Глава XIII

ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ И ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

§ 114. Ионизация газа и электрический разряд

В отличие от электронных (вакуумных) ламп в ионных, или газоразрядных, приборах ток создается не только направленным перемещением свободных электронов, но и вследствие перемещения заряженных частиц газа или паров ртути — ионов. В обычных условиях газ содержит ничтожное количество свободных электронов и ионов (носителей зарядов) и абсолютное большинство атомов и молекул газа электрически нейтральны (не заряжены). Поэтому в обычных условиях газ является хорошим диэлектриком.

Проводимость газа может быть вызвана его ионизацией сильным электрическим полем, высокой температурой, радиоактивными и космическими лучами. Газ становится проводником, если он содержит большое количество носителей заряда — свободных электронов и ионов. Процесс образования носителей зарядов называется ионизацией газа.

Ионные приборы наполнены разреженным газом или парами ртути и при своем движении электроны сталкиваются с атомами газа или ртутного пара. При соударении электроны отдают часть своей энергии атомам газа. При достаточно большой скорости электрона энергия, полученная атомом, оказывается достаточной для его возбуждения или ионизации. В возбужденном атоме один из его электронов под действием полученной при соударении энергии переходит на более высокий энергетический уровень (на более удаленную от ядра орбиту) и из-за неустойчивости этого положения очень быстро возвращается на свой прежний уровень, выделяя избыток энергии в виде светового излучения, так что газ будет светиться.

Если энергия, полученная атомами в результате соударения, достаточна для их расщепления на электроны и ионы, то происходит ионизация газа. Скорость движения электронов и их кинетическая энергия зависят от напряжения, т. е. возбуждение и ионизация атомов газа происходят при определенных значениях потенциала возбуждения $U_{\text{в}}$ и потенциала ионизации $U_{\text{и}}$, причем $U_{\text{и}} > U_{\text{в}}$. Так, например, для паров ртути $U_{\text{в}} = 5$ В, $U_{\text{и}} = 10$ В.

Процесс образования носителей зарядов в результате столкновения свободных электронов с атомами газа называется ионизацией соударением, или ударной ионизацией. В результате соударения свободные электроны могут выбить электроны из нейтральных молекул (атомов) или присоединиться к ним. В первом случае образуются ионы, положительно заряженные, во втором — отрицательно заряженные. Под действием электрического поля, созданного

напряжением, приложенным к электродам прибора, носители зарядов перемещаются в направлении электрического поля (от положительного электрода к отрицательному положительные ионы и в противоположном направлении электроны и отрицательно заряженные ионы). С увеличением приложенного напряжения скорости движения носителей зарядов возрастают.

При непрерывной ионизации газа с постоянной интенсивностью помимо расщепления атомов газа на электроны и ионы происходит обратный процесс их частичного соединения (рекомбинация), т. е. превращения в нейтральные атомы, и число носителей зарядов в единице объема остается постоянным.

Если напряжение между электродами ионного прибора (анодом и катодом) увеличить до определенной величины, называемой *напряжением зажигания* U_z , то скорость электронов и их кинетическая энергия становятся достаточными, чтобы при столкновении с нейтральными атомами ионизировать их. Вновь полученные вторичные заряды также ионизируют нейтральные атомы газа, т. е. процесс ионизации развивается лавинообразно. Промежуток между электродами заполняется ионизированным газом — газовой плазмой, обладающей высокой проводимостью. При этом число свободных электронов, а также ток через прибор резко возрастают и начинается *тлеющий разряд*, переходящий в самостоятельный, не требующий внешнего ионизатора для его поддержания. Тлеющий разряд сопровождается свечением газа и характерным шипящим звуком. Поддерживается тлеющий разряд при определенном напряжении между электродами, которое немного меньше напряжения зажигания (на несколько вольт). При таком напряжении положительные ионы, имеющие относительно большую массу, ударяются о поверхность катода, нагревают его и выбивают из него вторичные электроны, которые, двигаясь к аноду, ионизируют атомы газа, поддерживая ток в приборе.

Если напряжение между анодом и катодом окажется меньше необходимого, то скорость движения положительных ионов уменьшается, так что они не могут выбить из катода электроны, вследствие чего процесс ионизации может прекратиться.

Тлеющий разряд используется в неоновых и цифровых лампах, тиратронах, стабилитронах и других приборах. Если в приборе с тлеющим разрядом увеличить ток сверх определенного, наибольшего допустимого значения, то возникнет дуговой разряд, который опасен для прибора тлеющего разряда, так как вызывает разрушение катода вследствие бомбардировки его тяжелыми положительными ионами с большой силой.

При дуговом разряде плотность тока значительно больше, чем при тлеющем разряде. Таким образом, дуговой разряд может возникнуть при тлеющем разряде, если напряжение на разрядном промежутке повысить до некоторого значения, называемого *напряжением дуги*. При этом дуга поддерживается вследствие термоэлектронной эмиссии катода, раскаленного ударами положительных ионов, и разряд называется самостоятельным. Если термоэлектронная эмиссия катода создается нагревом катода от постороннего

источника питания, то дуговой разряд будет несамостоятельным.

Электрическая дуга возникает как в разряженном газе, так и при нормальном давлении. Если сблизить два электрода до их соприкосновения, то место их соприкосновения сильно нагревается проходящим током, обеспечивая ионизацию междуэлектродного промежутка и возникновение дуги при раздвинутых электродах. Электрическая дуга имеет очень высокую температуру и яркость, которые увеличиваются с повышением напряжения. Впервые электрическая дуга, открытая русским ученым В. В. Петровым в 1802 г., используется в электросварке, электрических печах, мощных прожекторах и др.

Сходство с дуговым разрядом имеет искровой разряд, при котором происходит кратковременный (импульсный) пробой промежутка между двумя электродами.

Кроме перечисленных выше видов электрического разряда в практике можно часто наблюдать коронный разряд, который возникает на поверхности проводов малого сечения или на заостренных концах проводов, т. е. там, где образуются значительные напряженности электрического поля. При некотором критическом значении напряженности поля возникает тихий разряд, вызванный ионизацией газа и сопровождаемый слабым свечением, заметным в темноте. Такой разряд называется короной.

§ 115. Газотрон

Газотрон представляет собой двухэлектродный ионный или газоразрядный прибор, предназначенный для выпрямления переменного тока. Стеклообразный (или металлический) баллон газотрона после создания в нем вакуума заполняется парами ртути или инертным газом при низком давлении. Внутри баллона помещены два электрода (рис. 158). Анод газотрона выполняют из никеля или графита и вывод анода 1 располагают в верхней части колбы, катод 3 вольфрамовый, покрыт слоем оксида. В мощных газотронах катод помещается внутри цилиндрического экрана для уменьшения тепловых потерь. Для разогрева катода он включается на низкое напряжение накала, величина которого составляет 2,5 В при ртутном наполнении и 5 В при наполнении баллона инертным газом. Более высокое напряжение накала недопустимо, так как может возникнуть дуга между концами катода. Ионизация газа или паров ртути может произойти

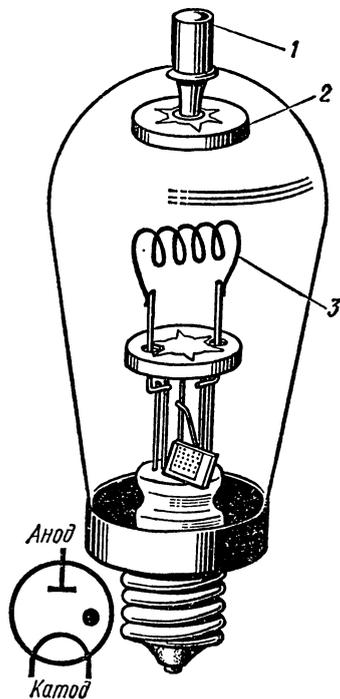


Рис. 158. Газотрон и его условное обозначение:

1 — вывод анода, 2 — анод, 3 — катод

при напряжении, значительно меньшем потенциала зажигания под действием последовательного ступенчатого возбуждения атомов. Таким образом, ток накала оказывается большим (амперы и десятки ампер), значительно бóльшим анодного тока, время разогрева катода составляет от нескольких минут до двух-трех десятков минут.

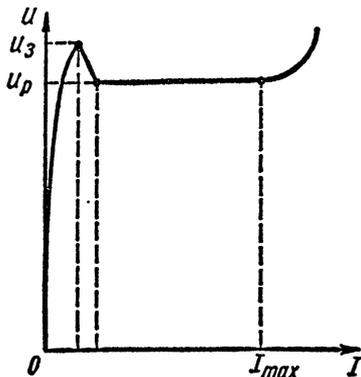


Рис. 159. Вольтамперная характеристика газотрона

С повышением анодного напряжения от нуля в газотроне возникает небольшой электронный ток, как и в вакуумном диоде, так как электроны в слабом электрическом поле перемещаются от катода к аноду с малой скоростью, недостаточной для ионизации газа. Этому режиму работы соответствует начальный участок вольтамперной характеристики (рис. 159). При повышении анодного напряжения до значения, равного потенциалу зажигания U_z , электроны под действием электрического поля развивают скорости, достаточные для возбуждения и ионизации атомов газа или паров ртути, т. е. в приборе нач-

нется процесс ионизации газа, вследствие чего образуется плазма и возникает дуговой разряд. Напряжение анода газотрона при его зажигании несколько уменьшается до рабочего напряжения U_p , после чего остается почти неизменным при изменении тока в газотроне. Падение напряжения на открытом газотроне состоит из падения вблизи анода, в плазме и вблизи катода, которое всегда значительно больше первых двух и составляет $10 \div 20$ В. Увеличение анодного тока больше максимального значения недопустимо, так как при этом увеличивается падение напряжения вблизи катода и тяжелые положительные ионы с большой силой ударяют в катод, в результате чего разрушается активный слой и газотрон выходит из строя.

Недостатком газотронов является большая чувствительность к изменению напряжения накала, которое допускается в пределах $+10$ и -5% от номинального. Повышение напряжения накала выше номинального ведет к распылению катода и уменьшает срок работы газотрона. При напряжении накала меньше номинального снижается температура катода и уменьшается скорость электронов, вылетевших из катода, в результате чего увеличивается катодное падение напряжения и уменьшается допустимый максимальный ток, т. е. разрушение катода начинается при меньшем анодном токе. Разрушение катода также будет происходить, если включить нагрузку при недостаточно нагретом катоде. Поэтому перед включением нагрузки катод должен быть прогрет в течение времени, указанного в паспортных данных газотрона.

Новые газотроны перед их включением подвергаются прогреву с малым анодным током (жестчению) для удаления налетов и пятен, которые могут оказаться на электродах при производстве газотронов.

При наполнении парами ртути газотроны имеют больший срок службы, чем при наполнении инертным газом, но при ртутном наполнении газотроны более чувствительны к изменению температуры окружающей среды.

§ 116. Тиратрон

Тиратрон отличается от газотрона наличием третьего электрода — сетки, которая управляет моментом зажигания дуги. В стеклянном баллоне тиратрона (рис. 160), наполненном смесью инертных газов, помещают анод 2, катод 5 и сетку 3. На рисунке изображен тиратрон с косвенным накалом (подогреватель 4), хотя часто тиратроны делают с прямым накалом. Катод окружен металлическим экраном 6, который

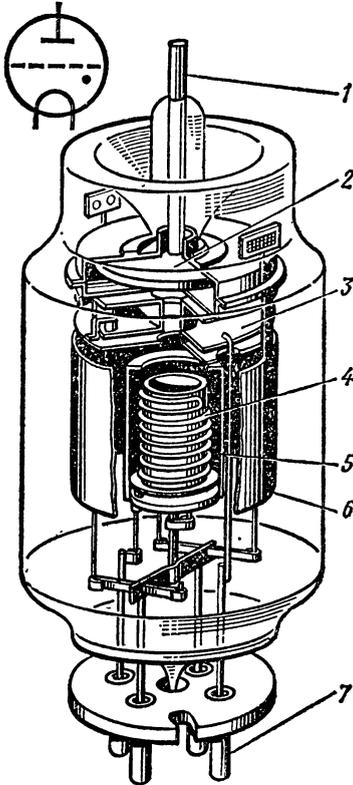


Рис. 160. Тиратрон с накальным катодом и его условное обозначение:
 1 — вывод анода, 2 — анод, 3 — сетка,
 4 — подогреватель катода, 5 — катод,
 6 — экран, 7 — вывод сетки

исключает возможность возникновения электрического поля между анодом и катодом помимо сетки. В верхней части экран закрыт диском с отверстиями. Вывод анода 1 находится в верхней части баллона, выводы катода и сетки 7 — на цоколе, в нижней части баллона.

В отличие от вакуумного триода в тиратроне изменение потенциала сетки не влияет на анодный ток, а смещает момент зажигания прибора, т. е. момент образования дуги. После зажигания тиратрона сетка теряет управляющее действие и погасить дугу, т. е. запереть тиратрон, изменяя потенциал сетки, нельзя.

На рис. 161, а изображена анодно-сеточная характеристика тиратрона.

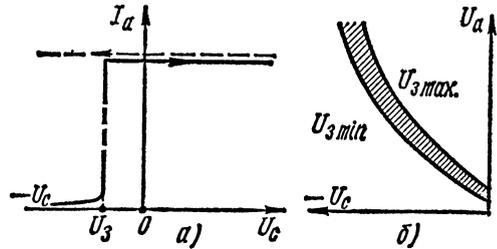


Рис. 161. Характеристики тиратрона:
 а — анодно-сеточная, б — пусковая

При достаточно большом отрицательном напряжении на сетке относительно катода электрическое поле между сеткой и катодом, направленное встречно основному полю тиратрона, будет препятствовать движению электронов к аноду и анодный ток будет равен нулю, т. е. тиратрон заперт. При уменьшении отрицательного на-

пряжения сетки до некоторого значения в анодной цепи появится очень небольшой ток, который с уменьшением отрицательного напряжения сетки постепенно увеличивается, как в вакуумном триоде. При уменьшении сеточного напряжения до некоторого значения U_3 скорость движения электронов становится достаточной для ионизации газа, возникает дуга и образуется плазма, т. е. тиратрон открывается. Зажигание тиратрона сопровождается скачкообразным увеличением анодного тока до величины, зависящей от анодного напряжения U_a и сопротивления нагрузки R_n . После зажигания дуги анодный ток не зависит от напряжения сетки. Если на сетку подавать положительное напряжение $+U_c$, то ее потенциал будет компенсирован электронами и отрицательными ионами, окружающими сетку. При отрицательном потенциале сетки $-U_c$ он компенсируется положительными ионами. Таким образом, сетка теряет свое управляющее действие и запереть лампу можно, лишь уменьшив анодное напряжение до нуля. Для ограничения сеточных токов в цепь сетки включается сопротивление $1 \div 100$ кОм.

При некотором напряжении между сеткой и катодом зажигание

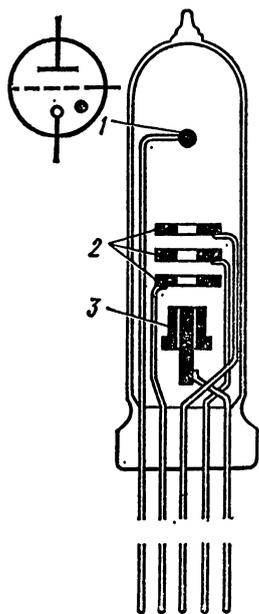


Рис. 162. Тиратрон с холодным катодом и его условное обозначение:

1 — анод, 2 — сетки, 3 — катод

тиратрона происходит при определенном напряжении анода, равном напряжению зажигания $U_a = U_3$. Таким образом, изменяя напряжение сетки, можно регулировать анодное напряжение $U_a = U_3$, при котором возникает дуга. Кроме потенциала сетки, на напряжение зажигания U_3 влияет давление внутри баллона, температура окружающей среды, ток накала, сопротивление цепи сетки и другие факторы. Поэтому при определенном напряжении на сетке зажигание тиратрона может произойти при анодном напряжении U_3 , имеющем значения в границах от $U_{3 \min}$ до $U_{3 \max}$, и пусковая характеристика тиратрона (рис. 161, б) приводится в виде области, лежащей между кривыми $U_{3 \min}$ и $U_{3 \max}$.

Вольтамперная характеристика тиратрона $U_a = f(I_a)$ имеет такой вид, как и у газотрона.

Тиратроны применяют в регулируемых выпрямителях, преобразователях постоянного тока в переменный (в инверторах), в схемах автоматического регулирования, управления, защиты и т. д.

Тиратрон с холодным катодом является нонным прибором с тлеющим разрядом. Такой тиратрон представляет собой стеклянный баллон, заполненный смесью инертных газов (аргон-неон, аргон-гелий и др.). Внутри баллона помещаются электроды: анод, катод и сетки (рис. 162).

При подаче тока между сеткой и катодом напряжения U_c возникает электрическое поле, под действием которого образуется началь-

ная ионизация и появляется тихий или темный разряд. Если на сетку будет подан положительный импульс напряжения, то ток в цепи сетки увеличится и тихий разряд между катодом и сеткой переходит в тлеющий. При напряжении между анодом и катодом U_a , достаточном для поддержания разряда, тлеющий разряд перебрасывается на анод, после чего тиратрон зажигается и сетка перестает влиять на ток тиратрона. Для гашения тиратрона анодное напряжение должно быть уменьшено так, чтобы оно стало ниже рабочего напряжения.

Достоинствами тиратронов с холодным катодом являются малые габариты и масса, большие механическая прочность и срок службы, отсутствие накала, широкий диапазон рабочих температур ($-60 \div +100^\circ\text{C}$). Недостаток тиратронов с холодным катодом — нестабильность их характеристик.

Они применяются в схемах автоматики, управления и защиты как бесконтактные реле.

§ 117. Ртутные вентили

Работа ртутного вентиля основана на использовании автоэлектронной эмиссии и ионизации паров ртути. Эти вентили относятся к приборам с самостоятельным дуговым разрядом и применяются в выпрямителях большой мощности при токах до нескольких тысяч ампер и напряжениях до 15 кВ и выше.

Простейший однофазный ртутный вентиль (рис. 163, а) имеет стеклянную колбу, из которой выкачан воздух. В колбу помещены два стальных или графитовых анода A_1 и A_2 . Нижняя часть колбы заполнена ртутью, которая служит катодом. В нижней части катода впаян стеклянный отросток, заполненный ртутью и являющийся анодом зажигания.

Для зажигания вентиля включают в сеть основной и вспомогательный трансформаторы Tp_0 и $Tp_в$, замыкают рубильник P_2 и наклоняют колбу так, чтобы ртуть анода зажигания A_3 соединилась с катодом. При этом под действием напряжения вторичной обмотки вспомогательного трансформатора $Tp_в$ в цепи анода A_3 и катода проходит ток.

При возвращении колбы в исходное положение контакт между ртутью анода A_3 и катода разрывается и образуется электрическая дуга, а на ртути катода возникает небольшое светящееся пятно, имеющее очень высокую температуру. Под воздействием тепла ртуть испаряется и вблизи ртути катода создается электрическое поле столь высокой напряженности, что оно вырывает свободные электроны с поверхности ртути, т. е. возникает автоэлектронная (или электро-

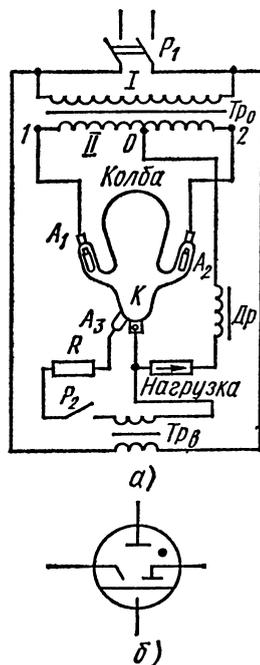


Рис. 163. Принципиальная схема ртутного выпрямителя (а) и условное обозначение экситрона (б)

статическая) эмиссия. Электроны, вылетевшие из катода, направляются к аноду (A_1 или A_2), который имеет положительный потенциал по отношению к катоду. На своем пути электроны сталкиваются с молекулами паров ртути и ионизируют их, т. е. отделяют от них электроны и образуют положительные ионы, которые ударяют о катод и поддерживают температуру катодного пятна. При изменении знака потенциала на аноде вследствие изменения напряжения вторичной обмотки основного трансформатора Tr_0 , дуга в колбе перебрасывается на другой анод, который в данный момент имеет положительный потенциал, т. е. дуга соединяет катод поочередно с каждым анодом.

Так как температура катодного пятна высокая, то давление паров ртути в колбе велико и для повышения допустимых обратных напряжений аноды помещаются в узкие отростки — рога с тем, чтобы повысить интенсивность охлаждения и понизить давление паров ртути вблизи анода. В процессе работы вентиля на внутренней поверхности рогов оседают пары ртути, являющиеся носителями отрицательных зарядов и играющие роль сетки с отрицательным зарядом. Эти заряды препятствуют зажиганию колбы, повышая потенциал зажигания. Для компенсации этих отрицательных зарядов на рога колбы надевают «манжеты», соединенные с анодами, так что при положительном потенциале анода «манжета», соединенная с этим анодом, будет иметь также положительный потенциал.

Помимо рабочих анодов A_1 и A_2 ртутные вентили могут иметь еще вспомогательные аноды, которые при включении вентиля зажигают дугу и поддерживают ее при снятии нагрузки. Такие вентили называются экситронами и условное обозначение их показано на рис. 163, б. Число рабочих анодов экситрона может быть 3 и 6.

В настоящее время вместо хрупких стеклянных колб применяют металлические, которые могут иметь как воздушное, так и водяное охлаждение.

Ртутный вентиль, не имеющий вспомогательных анодов возбуждения, называется и г н и т р о н о м. Помимо анода и катода игнитрон снабжен зажигателем, который искрой зажигает дугу в начале каждого положительного полупериода переменного напряжения. Игнитрон состоит из металлического корпуса с водяным охлаждением, внутри которого располагают графитовый анод, ртутный катод и зажигатель из карбида бора. Достоинства игнитрона — малые габариты, высокий КПД, небольшое падение напряжения ($15 \div 20$ В).

Вольтамперная характеристика ртутных вентилях подобна характеристике газотрона.

§ 118. Фотоэлементы с внешним фотоэффектом. Фотоумножители

Ф о т о э л е м е н т о м называется электровакuumный, полупроводниковый или ионный прибор, в котором воздействие лучистой энергии оптического диапазона вызывает изменение его электрических свойств.

Внешний фотоэффект или фотоэлектронная эмиссия заключается

в том, что источник излучения сообщает части электронов вещества дополнительную энергию, достаточную для выхода их из данного вещества в окружающую среду (в вакуум или разреженный газ). В вакуумных или электронных фотоэлементах движение электронов происходит в вакууме, в газонаполненных или ионных фотоэлементах электроны перемещаются в разреженном газе и ионизируют атомы газа.

Фотоэлемент с внешним фотоэффектом (рис. 164, а и б) имеет стеклянную колбу 2, в которой создан вакуум (в вакуумном фотоэлементе) или после откачки воздуха колба заполнена разреженным газом (аргоном при низком давлении — в ионных фотоэлементах). Внутренняя поверхность колбы, за исключением небольшого «окна» для прохождения светового потока 1, покрыта фотокатодом 3, который представляет собой слой серебра (подложка), на который нанесен полупроводниковый слой окиси цезия. Анод 4 фотоэлемента изготовляют в виде кольца, чтобы он не преграждал путь световому потоку к катоду. Колба помещается в пластмассовом цоколе 5, в нижней части которого находятся контактные штырьки 6 с выводами от анода и катода.

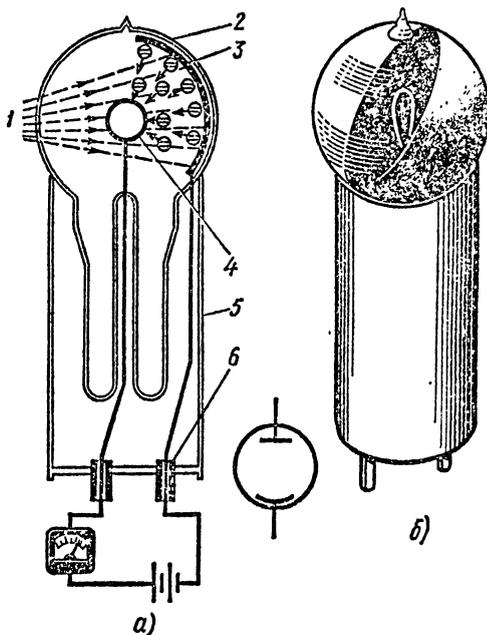


Рис. 164. Фотоэлемент с внешним фотоэффектом и его условное обозначение:

а — схема включения, б — внешний вид; 1 — световой поток, 2 — колба, 3 — фотокатод, 4 — анод, 5 — цоколь, 6 — контактные штырьки

Под действием приложенного напряжения U источника питания между анодом и катодом фотоэлемента создается электрическое поле, и электроны, вылетающие с освещенной поверхности катода, направляются к положительно заряженному аноду. Таким образом, в цепи установится фототок I_{Φ} , зависимость которого от светового потока Φ при неизменном напряжении источника питания ($I_{\Phi} = f(\Phi)$) называется световой характеристикой. В ионном фотоэлементе электроны ионизируют атомы газа и увеличивают поток электронов, т. е. увеличивают ток фотоэлемента, повышая его чувствительность.

Фотоэлектронная эмиссия и фототок фотоэлемента зависят от длины волны светового излучения, поэтому помимо световой чувствительности фотоэлементы характеризуются спектральной чувствительностью.

Анодные вольтамперные характеристики фотоэлементов показывают зависимость фототока от приложенного к зажимам фотоэлемента

напряжения при неизменном световом потоке, освещающем фотокатод, т. е. $I_{\Phi} = f(U)$ при $\Phi = \text{const}$. У электронного фотоэлемента фототок сначала быстро растет при увеличении напряжения, а затем рост его замедляется и, наконец, почти совсем прекращается, т. е. наступает режим насыщения (рис. 165, а). Для ионных фотоэлементов анодная вольтамперная характеристика после горизонтального участка (электронный ток) поднимается вверх вследствие ионизации газа (рис. 165, б).

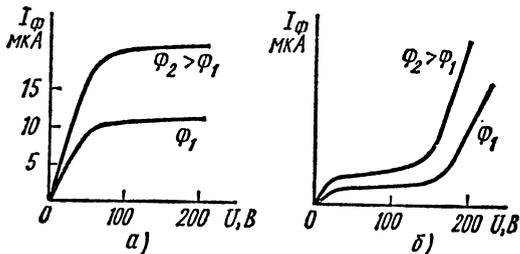


Рис. 165. Анодные вольтамперные характеристики фотоэлементов:
а — электронного, б — ионного

В процессе работы фотоэлементов их параметры со временем изменяются, т. е. проявляется свойство их «утомляемости». Обычно фотоэлементы используют совместно с ламповыми или транзисторными усилителями вследствие малого значения фототока, который может быть получен от фотоэлемента.

Наряду с фотоэлементами существуют фотоэлектронные приборы с усилением фототока, называемые фотоэлектронными умножителями. Эти приборы с внешним фотоэффектом, в которых фототок усиливается под действием вторичной электронной эмиссии. В стеклянном баллоне кроме фотокатода и анода расположен ряд вторичных эмиссионных катодов (рис. 166, а и б), поверхность которых покрыта эмиссионным составом. Между этими эмиссионными катодами имеется разность потенциалов примерно 100 В, повышаясь по мере удаления от фотокатода к аноду. При освещении фотокатода вылетающие с его поверхности первичные электроны под действием электрического поля между катодом и эмиссионным катодом — эмиттером вторичных электронов первого каскада с большой скоростью устремляются на этот эмиттер и выбивают с его поверхности вторичные электроны, число которых в несколько раз больше числа электронов, попавших на эмиттер первичных электронов. Под действием электрического поля между эмиттерами первого и второго каскадов электроны, вылетевшие с первого эмиттера с большой скоростью, ударяются о второй эмиттер и выбивают с его поверхности вторичные электроны, число которых также в несколько раз больше числа электронов, оказавшихся на нем.

Увеличенный поток вторичных электронов с эмиттера второго каскада попадает на эмиттер третьего каскада, усиливается этим и четвертым каскадами и достигает анода фотоумножителя.

Таким образом, в фотоумножителе происходит многократное увеличение числа вторичных электронов, т. е. усиление фототока.

Фотоэлектронные умножители применяются для измерения очень малых световых потоков (до 10^{-8} люмен) и выходной ток их не превышает нескольких десятков миллиампер.

§ 119. Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом и с запирающим слоем

Внутренний фотоэффект заключается в том, что источник излучения световой энергии вызывает увеличение энергии у части электронов вещества, ионизацию атомов и образование новых носителей зарядов (электронов и дырок), вследствие чего уменьшается электрическое сопротивление освещаемого материала. Если при внешнем

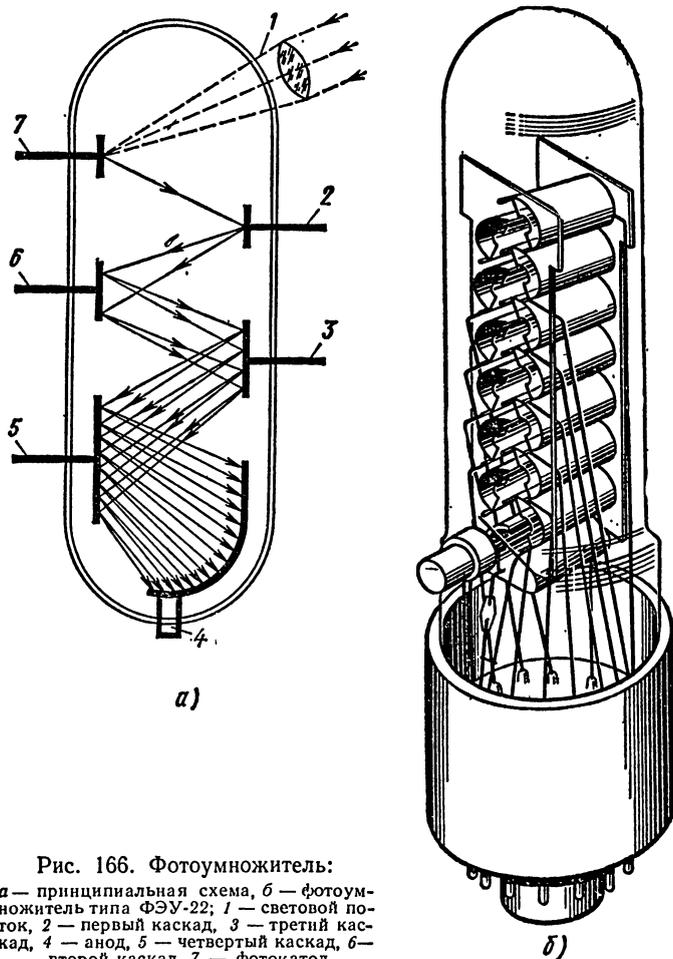


Рис. 166. Фотоумножитель:

a — принципиальная схема, *б* — фотоумножитель типа ФЭУ-22; 1 — световой поток, 2 — первый каскад, 3 — третий каскад, 4 — анод, 5 — четвертый каскад, 6 — второй каскад, 7 — фотокатод

фотоэффекте электроны покидают пределы освещаемого вещества, то при внутреннем фотоэффекте они остаются внутри вещества, увеличивая количество носителей электрических зарядов.

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом называются фоторезисторами (фотосопротивлениями). Они представляют собой полупроводниковые приборы, электрическое сопротивление которых

резко изменяется под действием падающего на них светового излучения. В качестве полупроводников применяют сернистый свинец (фоторезистор ФСА), селенид кадмия (фоторезистор ФСД), сернистый кадмий (фоторезистор ФСК). Фоторезисторы ФСА применяются в инфракрасной, а остальные — в видимой области света. Чувствительность фоторезисторов значительно выше чувствительности фотоэлементов с внешним фотоэффектом, так что в ряде устройств фоторезисторы заменяют ранее используемые фотоэлементы с внешним фотоэффектом.

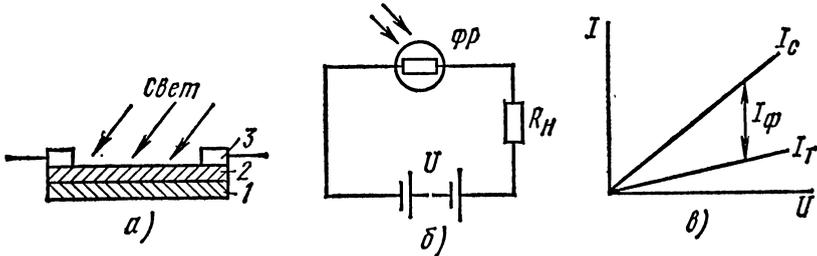


Рис. 167. Фоторезистор:

а — схема устройства, *б* — схема включения и условное обозначение ФР, *в* — вольтамперная характеристика; 1 — пластинка, 2 — слой полупроводника, 3 — электроды

Фоторезистор представляет собой (рис. 167, *а*) стеклянную пластинку 1, на которую нанесен тонкий слой полупроводника 2, покрытый прозрачным лаком для защиты от механических повреждений и влаги. По краям выведены два металлических электрода 3. Фоторезистор помещен в пластмассовый корпус с двумя штырьками, к которым присоединяются электроды. Условное обозначение и схема включения фоторезистора показаны на рис. 167, *б*. Фоторезистор работает только от внешнего источника питания и имеет одинаковое сопротивление в обоих направлениях.

Неосвещенный фоторезистор обладает большим «темновым» сопротивлением R_T (от сотен килоом до нескольких мегаом) и через него проходит малый «темновой» ток I_T . При освещенном фоторезисторе его сопротивление резко уменьшается и ток увеличивается до некоторого значения I_c , зависящего от интенсивности освещения. Разность между токами при освещении и «темновым» называется фототоком, т. е. $I_\Phi = I_c - I_T$. Вольтамперная характеристика фоторезистора (рис. 167, *в*), т. е. зависимость фототока от напряжения источника питания при неизменном световом потоке $I_\Phi = f(U)$ при $\Phi = \text{const}$ линейна.

К недостаткам фоторезисторов относится их инерционность (при освещении фототок не сразу достигает своего конечного значения, а лишь через некоторое время), нелинейность световой характеристики (фототок возрастает медленнее, чем сила света), зависимость электрического сопротивления и фототока от температуры окружающей среды.

Фотоэлементы с фотоэффектом в запирающем слое, называющиеся **в е н т и л ь н ы м и ф о т о э л е м е н т а м и**, имеют запирающий

слой между полупроводниками с p - и n -проводимостями. В этих фотоэлементах под воздействием светового излучения возникает эдс, называемая фото-эдс. Для изготовления вентильных фотоэлементов применяют селен, сернистый таллий, сернистое серебро, германий и кремний.

Освещение поверхности фотоэлемента вблизи p - n -перехода вызывает ионизацию атомов кристалла и образование новых пар свободных носителей зарядов — электронов и дырок. Под действием электрического поля p - n -перехода образующиеся в результате ионизации атомов кристалла электроны переходят в слой n , а дырки — в слой p , что приводит к избытку электронов в слое n и дырок в слое p . Под действием разности потенциалов (фото-эдс) между слоями p и n во внешней цепи проходит ток I , направленный от электрода p к электроду n . Этот ток зависит от количества носителей зарядов — электронов и дырок, т. е. от силы света. Чувствительность вентильных фотоэлементов высока (до 10 мА/лм), они не требуют источника питания и находят широкое применение в различных областях электроники, автоматики, измерительной техники и т. д.

Принцип устройства кремниевого фотоэлемента с запирающим сло-

ем показан на рис. 168. На пластину кремния 1 с примесью, создающей электронную проводимость, вводят примесь бора путем диффузии в вакууме, в результате этого образуется слой полупроводника с дырочной проводимостью 2 очень малой толщины, так что световые лучи свободно проникают в зону перехода. Батареи кремниевых элементов находят применение для непосредственного преобразования солнечной энергии в электрическую. Такие преобразователи, называемые солнечными батареями, применяют, например, на искусственных спутниках Земли для питания их аппаратуры.

Полупроводниковый фотоэлемент с двумя электродами, разделенными p - n -переходом, называемый фотодиодом, может работать как с внешним источником питания (преобразовательный режим), так и без внешнего источника (генераторный режим).

При работе в генераторном режиме фотодиода его освещение вызывает возникновение фото-эдс, под действием которой во внешней цепи через нагрузку проходит ток, т. е. источником питания является фотодиод. При работе в фотопреобразовательном режиме напряжение внешнего источника питания приложено встречно фото-эдс и фотодиод подобен фоторезистору с более высокой чувствительностью. Если фотодиод не освещен, то через него проходит небольшой обратный ток (темновой ток) под действием внешнего источника питания. При освещении электронной области фотодиода образуются носители зарядов — электроны и дырки. Дырки доходят до p - n -перехода и

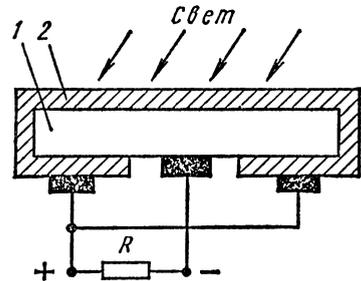


Рис. 168. Схема устройства кремниевого вентильного фотоэлемента: 1 — пластина кремния, 2 — слой полупроводника

под действием электрического поля переходят в p -область, т. е. освещение вызывает увеличение числа перешедших неосновных носителей из n -области в p -область, и, следовательно, ток в цепи возрастает (возникает фототок).

Контрольные вопросы

1. Почему в обычных условиях газ является диэлектриком?
2. Объясните процесс ионизации газа.
3. Какие приборы называются ионными?
4. Расскажите устройство газотрона.
5. Изобразите вольтамперную характеристику газотрона.
6. Объясните работу тиратрона с накальным катодом.
7. Объясните принцип работы ртутного выпрямителя.
8. Какие приборы называются фотоэлементами с внешним и внутренним фотоэффектом?

Глава XIV

УСТРОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

§ 120. Выпрямители

Выпрямителем называется статический преобразователь переменного тока в постоянный, который используется в ряде отраслей промышленности (транспорт, электрохимия, питание электронной аппаратуры и т. д.).

Для преобразования переменного тока в постоянный служат электрические вентили различных типов:

электронные (кенотроны), полупроводниковые (германиевые, кремниевые и др.), ионные (газотроны, тиратроны и др.). Каждый вентиль характеризуется следующими параметрами: амплитудой тока, средним значением тока, амплитудой обратного напряжения, внутренним сопротивлением. Амплитуда тока вентиля ограничивается насыщением (кенотроны с вольфрамовым катодом) или началом разрушения катода (кенотроны с оксидированным катодом, газотроны, тиратроны). Среднее значение тока

определяет тепловой режим вентиля, так что повышение среднего значения тока поведет к перегреву вентиля. Амплитуда обратного напряжения — это то наибольшее напряжение, которое может быть приложено к вентилю в обратном (непроводящем) направлении, не подвергая его опасности пробоя. Внутреннее сопротивление определяет потери энергии и падение напряжения в вентиле. Так как вольтамперная характеристика вентиля нелинейна, то внутреннее сопротивление не постоянно и чем меньше оно, тем экономичнее выпрямитель, так как меньше потери энергии в нем.

Для выпрямления больших токов селеновые вентили соединяют параллельно, а для получения высоких напряжений — последовательно. Параллельно можно соединять вентили одной группы, вольтамперные характеристики которых совпадают, а последовательно — вентили одного класса с совпадающими обратными характеристиками.

Вольтамперные характеристики германиевых и кремниевых вентилях имеют большой разброс и сильно меняются с изменением температуры. Поэтому для выравнивания токов в вентилях при их параллельном соединении вводят добавочные (выравнивающие) сопротивления R_B (рис. 169, а), а для выравнивания обратных напряжений

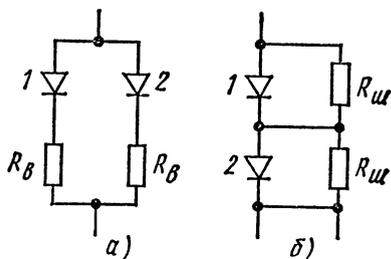


Рис. 169. Схемы соединения вентилях:
а — параллельного, б — последовательного

при последовательном соединении вентилей их шунтируют сопротивлениями $R_{ш}$ (рис. 169, б).

В выпрямителях вентили выпрямителя напряжение с различным, которые создают на выходе выпрямителя напряжение с различным

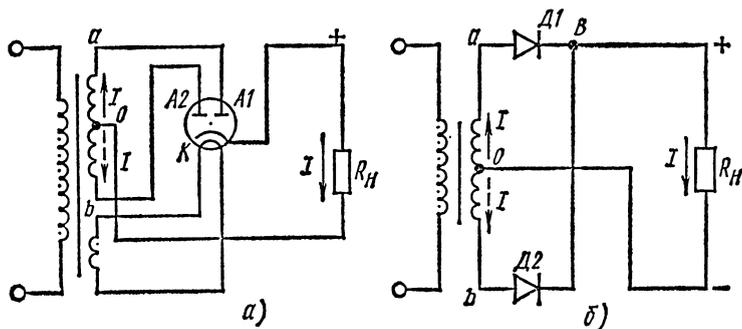


Рис. 170. Двухполупериодная схема выпрямления:
а — кенотронного, б — полупроводникового

числом циклов выпрямления m . Однополупериодная схема выпрямления ($m=1$) на практике почти не применяется из-за ряда существенных ее недостатков.

Двухполупериодная ($m=2$) схема выпрямления с двуханодным

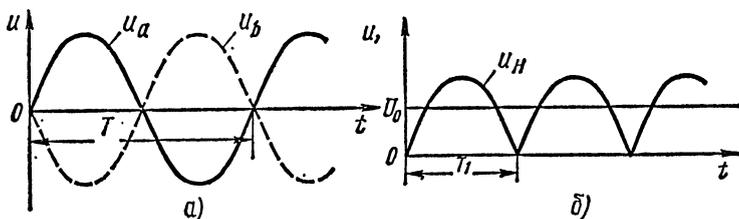


Рис. 171. Кривые напряжений в двухполупериодной схеме выпрямления:
а — в фазах вторичной обмотки, б — на нагрузке

кенотроном изображена на рис. 170, а и с полупроводниковыми диодами — на рис. 170, б. В часть периода, когда эдс вторичной обмотки направлена снизу вверх, точка a и анод вентиль $A1$ (или диод $D1 - B$), имеют положительный потенциал, так что под действием эдс фазы a вторичной обмотки ток проходит по цепи: от точки a через $A1 - K$ (или диод $D1 - B$), сопротивление нагрузки R_n к средней точке O вторичной обмотки трансформатора. При изменении направления эдс вторичной обмотки положительный потенциал имеет точка b и ток протекает от точки b через $A2 - K$ (или диод $D2 - B$), сопротивление нагрузки R_n к средней точке O вторичной обмотки. Таким образом, в нагрузке ток проходит в неизменном направлении. Вторичная обмотка трансформатора двухфазная и каждая фаза a и b работает половину периода, эдс этих фаз u_a и u_b сдвинуты по фазе на половину периода (рис. 171, а). Напряжение на нагрузке u_n в любой момент равно мгновенному значению эдс фазы, работающей в данный момент.

Кривые изменения напряжения u_n и тока i_n изображены на рис. 171, б. Напряжение помимо постоянной составляющей U_0 (среднее значение) содержит переменную составляющую, т. е. напряжение u_n так же, как и ток i_n , не постоянны, а пульсируют.

Достоинством схемы является малое число вентилях (два вентиля или один двуханодный кенотрон). К недостаткам ее следует отнести наличие большой переменной составляющей напряжения (пульсация), амплитуда которой $U_m \sim 0,67U_0$, необходимость вывода средней точки вторичной обмотки трансформатора, большое обратное напряжение, равное $U_{обр} = 2U_m = 3,14U_0$, где U_m — амплитуда эдс фазы вторичной обмотки. Период изменения напряжения на нагрузке T_1 вдвое меньше периода изменения напряжения сети T , следовательно, частота первой гармоники переменной составляющей, т. е. частота пульсации напряжения f_1 , вдвое больше частоты тока сети ($f_1 = 2f$).

Однофазная мостовая схема выпрямления (рис. 172) содержит четыре вентиля, к одной диагонали моста подключается вторичная обмотка трансформатора, а к другой — нагрузка R_n . При направлении эдс вторичной обмотки снизу вверх точка a имеет положительный потенциал и ток проходит по цепи: вторичная обмотка трансформатора, точки a, A , диод $D1$, точка B , сопротивление нагрузки R_n , точка Γ , диод $D3$, точка B , точка b вторичной обмотки. При изменении направления эдс и тока во вторичной обмотке трансформатора замкнутая цепь будет: точки b, B , диод $D2$, точка A , сопротивление нагрузки R_n , точка Γ , диод $D4$, точки A и a . Таким образом, ток в нагрузке не изменяет направления, но изменяется по величине. Кривые изменения напряжения u_n и тока нагрузки i_n имеют такой же вид, как и в двухполупериодной схеме. Амплитуда пульсации напряжения $U_m \sim 0,67U_0$ при частоте ее $f_1 = 2f$. В мостовой схеме нет необходимости в выводе средней точки вторичной обмотки трансформатора, она имеет меньшее, чем двухполупериодная схема, обратное напряжение $U_{обр} = U_m = 1,57U_0$ (вместо $3,14U_0$), но содержит четыре вентиля (вместо двух).

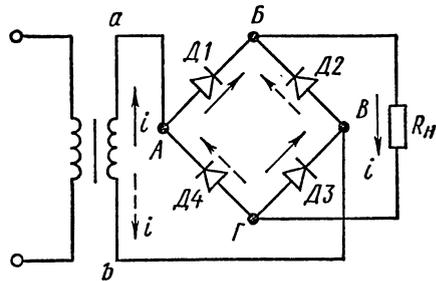


Рис. 172. Однофазная мостовая схема выпрямления

В трехфазной схеме выпрямления (рис. 173, а) три вентиля анодами соединены с началами фаз трехфазной вторичной обмотки. Катоды трех вентилях образуют общую точку, являющуюся плюсовым полюсом на выходе выпрямителя; минусовый полюс — средняя точка вторичной обмотки. В любой момент будет открыт тот вентиль, напряжение на аноде которого наиболее положительно. Напряжения в фазах вторичной обмотки равны между собой по амплитуде и частоте, но сдвинуты по фазе на одну треть периода $T/3$ (рис. 173, б). На каждом вентиле наиболее положительное напряжение будет также в течение одной трети периода $T/3$ и напряжение на нагрузке будет представ-

лать огибающую синусоид эдс в фазах вторичной обмотки. Период изменения напряжения на нагрузке $T_1 = T/3$, т. е. частота пульсации $f_1 = 3f$, а ее амплитуда $U_m \approx 0,25U_0$. Таким образом, амплитуда пульсации в трехфазной схеме выпрямления значительно меньше, чем в двухполупериодной и мостовой схемах, а частота пульсации больше.

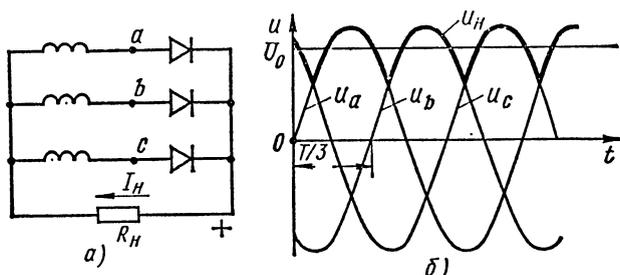


Рис. 173. Трехфазная схема выпрямления (а) и кривая выпрямленного напряжения (б)

Обратное напряжение на вентиле в трехфазной схеме составляет $U_{обр} = 2,1U_0$.

Если в выпрямителях использовать управляемые вентили, то можно будет регулировать выходное напряжение на нагрузке. Неуправляемый вентиль открывается, если на аноде его потенциал выше потенциала катода. Управляемый же вентиль будет оставаться закрытым при положительном потенциале анода, если на его управляющем электроде нет отпирающего напряжения. Если в какой-либо схеме выпрямления, например трехфазной (рис. 173, а), вместо диодов в каждую фазу включить управляемые вентили (например, тиристоры) и менять моменты их открывания, то выпрямленное напряжение будет изменяться. Часть периода, в течение которой вентиль остается закрытым, несмотря на то что анод его имеет положительный потенциал, называется углом регулирования α . При отсутствии регулирования $\alpha = 0$ каждый вентиль открывается в момент, когда потенциал анода его положителен и кривая выпрямленного напряжения будет такой же, как и для неуправляемого выпрямителя (рис. 174, а). Если управляющий импульс для открытия вентиля автоматическим устройством подать с отставанием на угол $\alpha' > 0$, то вентиль в течение части периода α' будет закрыт и выпрямленное напряжение будет равно эдс ранее работавшей фазы. В момент $\omega t = \alpha'$ открывается очередной вентиль и выпрямленное напряжение становится равным эдс фазы, вновь вступающей в работу (рис. 174, б). Среднее значение выпрямленного напряжения уменьшится за $1/3$ периода на величину, соответствующую заштрихованной площадке ($U_0' < U_0$). При увеличении угла регулирования $\alpha'' > \alpha'$ (рис. 174, в) происходит дальнейшее уменьшение выпрямленного напряжения ($U_0'' < U_0'$) и, увеличивая угол регулирования далее, можно изменять выпрямленное напряжение до нуля.

Такой способ регулирования напряжения экономичен, так как он не связан с дополнительной затратой энергии, но при регулировании сильно возрастает пульсация выходного напряжения.

§ 121. Сглаживающие фильтры

Выпрямленное напряжение при любой схеме выпрямления помимо постоянной составляющей U_0 (среднее значение) содержит переменную составляющую (пульсацию), амплитуда $U_{m\sim}$ и частота f_1 которой зависят от схемы выпрямления. Для однополупериодной схемы выпрямления $U_{m\sim} = 1,57U_0$ и $f_1 = f$, где f — частота тока сети. Для всех остальных схем выпрямления $U_{m\sim} = \frac{2}{m^2-1}U_0$ и $f_1 = mf$, где

m — число фаз выпрямления ($m=2$ для двухполупериодной и мостовой схем, $m=3$ для трехфазной схемы и т. д.). Пульсация напряжения оказывает вредное влияние — увеличивает потери, создает помехи и др. Поэтому выпрямленное напряжение обычно непригодно для питания потребителя и необходимо уменьшить его пульсацию, для чего устанавливают сглаживающий фильтр между выпрямителем и приемником энергии. Степень ослабления пульсации сглаживающим фильтром определяется коэффициентом сглаживания, равным отношению амплитуд переменных составляющих напряжений на входе и выходе фильтра, т. е.

$$q = U_{m\sim\text{вх}}/U_{m\sim\text{вых}}.$$

Фильтры могут быть емкостные, индуктивные и индуктивно-емкостные. В емкостном фильтре (рис. 175, а) конденсатор C включен параллельно нагрузке и напряжение на конденсаторе равно напряжению на нагрузке. Когда напряжение вторичной обмотки трансформатора больше напряжения на нагрузке ($u_2 > u_n$), вентиль D открыт и через него проходит ток i_n , заряжающий конденсатор i_c и питающий нагрузку i_n , т. е. $i_b = i_c + i_n$. При заряде конденсатора u_n повышается (рис. 176). При $u_2 < u_n$ вентиль закрывается и начинается разряд конденсатора на нагрузку. Напряжение при этом понижается. Для двухполупериодной схемы длительность работы фазы становится меньше половины периода и зависит как от емкости конденсатора,

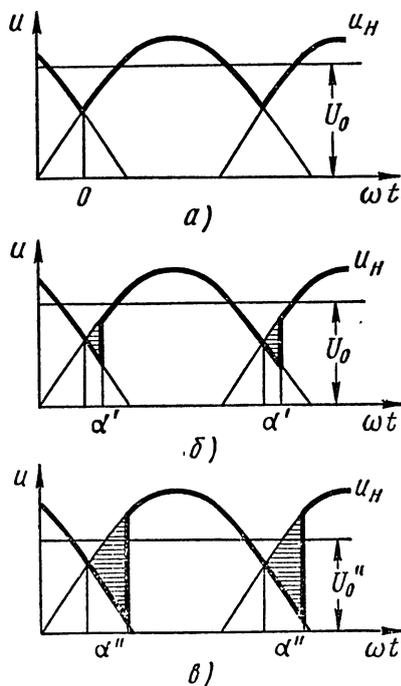


Рис. 174. Кривые регулируемого выпрямленного напряжения при различных углах регулирования:
а — $\alpha=0$, б — $\alpha'>0$, в — $\alpha''>\alpha'$

так и от сопротивления нагрузки. При включении конденсатора пульсация выпрямленного напряжения уменьшается и становится тем меньше, чем больше емкость конденсатора.

В выпрямителях малой мощности находят применение резисторно-емкостные RC -фильтры (см. рис. 175, б), коэффициент сглаживания

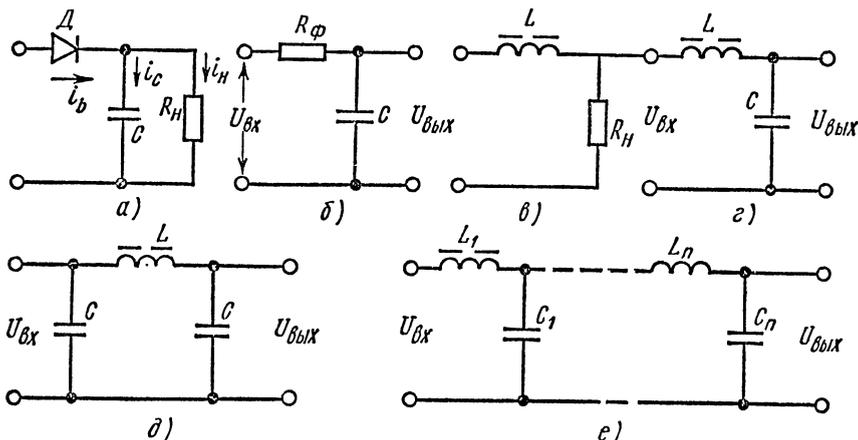


Рис. 175. Схемы сглаживающих фильтров:

а — емкостного, б — резисторно-емкостного, в — индуктивного, г — индуктивно-емкостного, д — П-образного, е — многозвенного индуктивно-емкостного

которых $q = m\omega RC$, где m — число фаз выпрямления, $\omega = 2\pi f$ — угловая частота тока сети.

В индуктивных фильтрах (рис. 175, в) сглаживание пульсации напряжения будет лишь при индуктивном сопротивлении дросселя, много большем сопротивления нагрузки, т. е. $m\omega L \gg R_n$. Индуктивно-емкостные Г-образные фильтры (рис. 175, г) применяются наиболее часто. Непременным условием для этих фильтров является неравенство $m\omega L \gg \frac{1}{m\omega C}$, т. е. индуктивное сопротивление дросселя

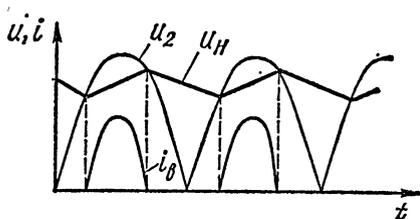


Рис. 176. Кривая выпрямленного напряжения и тока в вентиле при емкостном фильтре

должно быть много больше емкостного сопротивления конденсатора для переменной составляющей тока. Коэффициент сглаживания LC -фильтров $q = (m\omega)^2 LC - 1$.

П-образный индуктивно-емкостный фильтр (рис. 175, д) можно рассматривать как двухзвенный, первое звено которого является емкостным, а второе — индуктивно-емкостным фильтром.

При очень жестких требованиях на допустимую пульсацию напряжения могут быть использованы многозвенные сглаживающие фильтры (рис. 175, е), коэффициент сглаживания которых равен произведению коэффициентов сглаживания отдельных звеньев, т. е. $q = q_1 q_2 \dots q_n$.

§ 122. Стабилизаторы напряжения

Все потребители электрической энергии чувствительны к изменению напряжения, т. е. требует его постоянства (стабилизации) с определенной степенью точности. В качестве параметрических стабилизаторов применяют газоразрядные и кремниевые стабилитроны.

Газоразрядный стабилитрон, представляющий собой прибор тлеющего разряда, имеет стеклянный баллон (рис. 177, а), заполненный смесью инертных газов аргон-неон, аргон-гелий или других газов при низком давлении. Внутри баллона помещены два электрода — катод 1 и анод 2. Вольтамперная характеристика стабилитрона (рис. 177, б) имеет такой же вид, как и любого газоразрядного прибора. Стабилитрон характеризуется следующими величинами: напряжением стабилизации U_c , напряжением зажигания U_3 , минимальным током ионизации $I_{мин}$, максимальным током $I_{макс}$, превышение которого ведет к разрушению катода, динамическим сопротивлением на рабочем участке в диапазоне от $I_{мин}$ до $I_{макс}$.

Кремниевые стабилитроны представляют собой разновидность кремниевых диодов с повышенной концентрацией носителей зарядов

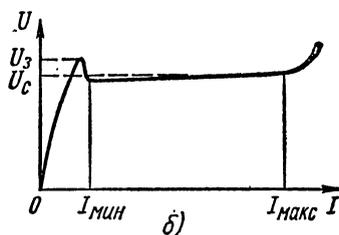
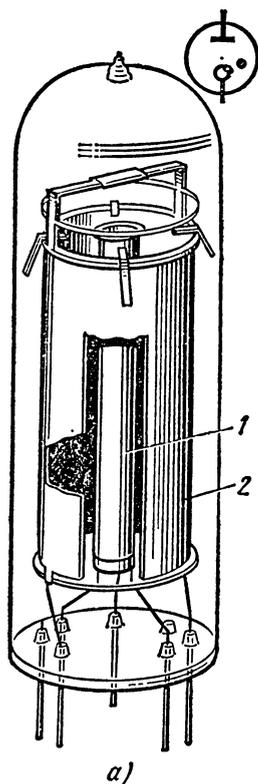


Рис. 177. Устройство газоразрядного стабилитрона с его условным обозначением (а) и его вольтамперная характеристика (б):

1 — катод, 2 — анод

в полупроводниках. Для кремниевых стабилитронов рабочим участком вольтамперной характеристики (рис. 178) является часть, соответствующая обратным напряжению и тока, расположенная почти параллельно оси токов в диапазоне от $I_{мин}$ до $I_{макс}$.

Схемы включения газоразрядного и кремниевого стабилитронов изображены на рис. 179, а и б. На входе стабилизатора действует изменяющееся напряжение входа $U_{вх}$; между этим напряжением и стабилитроном включено гасящее сопротивление R_r . Так как стабилитрон включен параллельно нагрузке, то напряжение на стабилитроне U_c , равное напряжению на нагрузке U_n , можно определить

следующим выражением: $U_c = U_n = U_{вх} - U_r$, где $U_r = R_r(I_c + I_n)$ — падение напряжения в гасящем сопротивлении. При изменении напряжения на входе $U_{вх}$, например при его увеличении, в некоторой степени повысится напряжение на выходе, т. е. на стабилитроне,

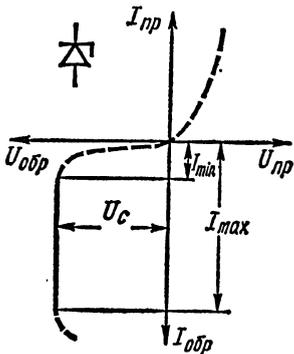


Рис. 178. Вольтамперная характеристика и условное обозначение кремниевого стабилитрона

что вызовет возрастание тока как в стабилитроне, так и в гасящем сопротивлении, и, следовательно, увеличится падение напряжения на этом сопротивлении. Таким образом, при повышении напряжения на входе возрастет падение напряжения на гасящем сопротивлении, компенсируя повышение напряжения на входе стабилизатора и поддерживая постоянство напряжения на нагрузке. Понижение напряжения на входе вызовет уменьшение падения напряжения на гасящем сопротивлении, так как ток в этом сопротивлении, как и в стабилитроне, уменьшится.

Как газоразрядные, так и кремневые стабилитроны соединяют последовательно для получения различных напряжений на нагрузке. Параллельное соединение стабилитронов не имеет смысла, так как вследствие несовпадения их вольтамперных характеристик все параллельно включенные стабилитроны не будут работать в зоне стабилизации напряжения. При жестких требованиях к стабильности напряжения стабилизаторы составляются из нескольких ступеней — каскадов (рис. 179, в), у которых коэффициент стабилизации равен произведению коэффициентов стабилизации всех звеньев стабилизатора.

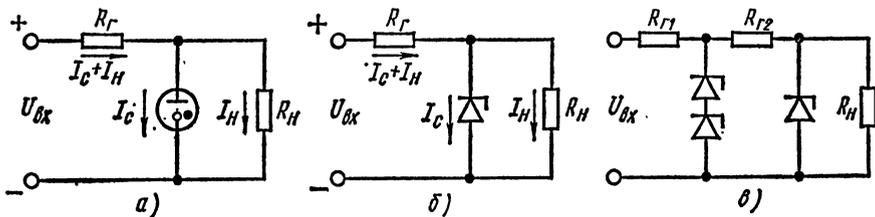


Рис. 179. Схемы включения стабилитронов:
а — газоразрядного, б — кремниевого, в — двухкаскадного

Коэффициентом стабилизации стабилизатора называется отношение относительного изменения напряжения входа к относительному изменению напряжения выхода, т. е.

$$K_{ст} = \frac{\Delta U_{вх}/U_{вх}}{\Delta U_{вых}/U_{вых}} = \frac{\Delta U_{вх} U_{вых}}{\Delta U_{вых} U_{вх}}$$

Стабилизаторы на стабилитронах могут иметь невысокий коэффициент стабилизации (в несколько десятков) и низкий кпд.

Газоразрядные и кремниевые стабилитроны могут быть использованы для стабилизации переменного напряжения, форма кривой которого на выходе близка к прямоугольной.

§ 123. Усилители низкой частоты

Электронные усилители предназначены для усиления напряжения, тока или мощности слабых электрических сигналов (колебаний). Усиление колебаний осуществляется электронной лампой или транзистором под воздействием источников энергии, питающих усилитель.

Электронные усилители можно классифицировать по ряду признаков: 1) по роду усиливаемой величины — усилители напряжения, усилители тока, усилители мощности; 2) по диапазону частот — усилители низкой частоты, усилители высокой частоты, усилители постоянного тока; 3) по числу каскадов (ступеней) усиления — одно-, двух- и многокаскадные.

Мощность выходных колебаний усиливается в основном в связи с усилением напряжения в усилителях напряжения и усилением тока в усилителях тока и мощности.

Основными параметрами усилителей являются коэффициент усиления, диапазон усиливаемых частот, выходное напряжение или выходная мощность, кпд. Коэффициентом усиления усилителя напряжения называется отношение напряжения на выходе к напряжению на входе, т. е. $K_U = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$. Коэффициентом усиления усилителя мощности называется отношение мощности на выходе к мощности на входе усилителя, т. е. $K_P = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$.

Коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления его каскадов. По способу связи между каскадами усилители могут быть с гальванической, резистивно-емкостной и трансформаторной связями. В диапазоне частот усилителя изменения коэффициента усиления не должны превышать допустимых пределов. Промышленным кпд усилителя называется отношение выходной мощности усилителя к суммарной мощности питания всех его цепей, т. е. $\eta = P_{\text{вых}}/P_{\text{пит}}$.

Проходя через усилитель, форма электрического сигнала нарушается под воздействием частотных, амплитудных и фазовых искажений. Частотные искажения формы электрического сигнала возникают вследствие различной степени усиления напряжений различных частот, составляющих усиливаемый сигнал. Частотные искажения оцениваются коэффициентом частотных искажений, показывающим, насколько усиление на данной частоте f отклоняется от усиления на средней частоте, т. е. $M = K_{\text{ср}}/K_f$. Обычно допустимое значение коэффициента частотных искажений принимают $M = 1,25$.

Амплитудные или нелинейные искажения возникают вследствие нелинейности характеристик электронных ламп, транзисторов, сопротивления нагрузки и вызывают искажения формы кривых усиливаемых сигналов. Фазовые искажения, представляющие собой изменения фазы электрического сигнала на выходе усилителя относительно

фазы сигнала на его входе, возникают из-за реактивных элементов (индуктивностей и емкостей), включаемых в схему усилителя.

В усилителях широко используют обратную связь, т. е. воздействие выходной цепи усилителя на ее входную цепь. Для соединения выходной цепи усилителя с его входом служит цепь обратной связи.

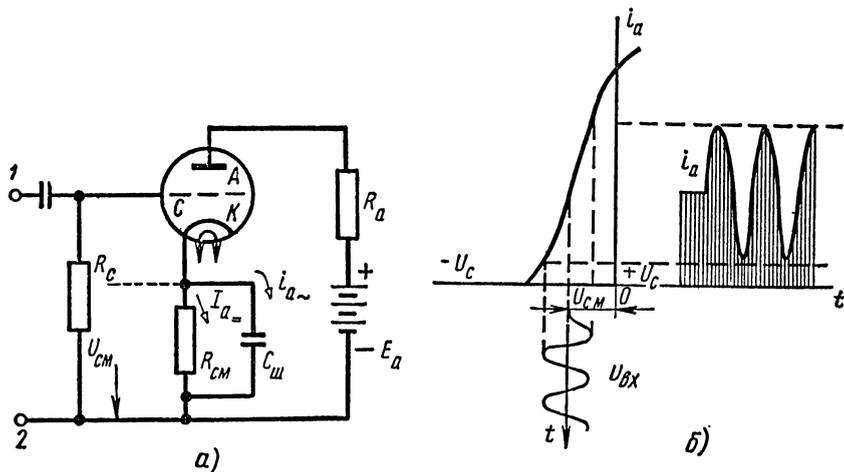


Рис. 180. Схема простейшего лампового усилителя (а) и процесс усиления (б)

Если сигнал с выхода усилителя на его вход приходит совпадающим по фазе с усиливаемым сигналом, то это увеличит общий коэффициент усиления и обратная связь называется положительной.

Если обратная связь вызывает уменьшение коэффициента усиления, то она называется отрицательной. Отрицательная обратная связь улучшает стабильность работы и характеристики усилителя, уменьшает нелинейные искажения, так как всякая гармоника, искажающая форму сигнала, после усиления подается через цепь обратной связи на вход усилителя с противоположной фазой, частично компенсируя искажение сигнала.

При использовании в качестве усилителя электронной лампы необходимо, чтобы сетка имела отрицательный потенциал относительно катода, так как при положительном потенциале на сетке возникают сеточные токи, которые искажают усиливаемый сигнал. Для создания отрицательного смещения на сетке лампы может быть использован отдельный источник — батарея смещения, но применение такого источника увеличивает габариты, массу и стоимость устройства. Поэтому обычно применяют автоматическое смещение сеточного напряжения, которого достигают падением напряжения на резисторе R_{cm} (рис. 180, а), включенном в цепь катода усилительной лампы. Постоянная составляющая анодного тока $I_{a=}$, проходя по этому резистору, создает падение напряжения $U_{cm} = I_{a=} R_{cm}$, и потенциал сетки автоматически понижается относительно катода на величину U_{cm} . Переменная составляющая анодного тока замыкается через шунтирующий конденсатор $C_{ш}$, включенный параллельно резистору

$R_{см}$. Сопротивление конденсатора $C_{ш}$ для переменной составляющей должно быть много меньше сопротивления $R_{см}$ с тем, чтобы падение напряжения переменной составляющей анодного тока в резисторе $R_{см}$ не влияло на сеточное напряжение. Отрицательное смещение

подается на сетку через резистор R_c , через который электроны, попавшие на сетку, стекают на катод. Если отключить резистор R_c , то на сетке будут скапливаться электроны, заряд которых может запереть лампу. На зажимы резистора R_c (1 и 2) подается напряжение от источника входного сигнала $u_{вх}$, подлежащего усилению. Сопротивление резистора R_c должно быть достаточно большим (0,5 ÷ 1 МОм) с тем, чтобы входное сопротивление схемы было стабильным. Входное напряжение усилителя $u_{вх}$, приложенное к резистору R_c , включено в цепь между катодом и сеткой лампы, в результате чего изменяется отрицательное смещение на сетке. При положительной половине $u_{вх}$ отрицательное смещение на сетке лампы уменьшается — ($U_{см} - u_{вх}$) и анодный ток лампы i_a увеличивается (рис. 180, б). При отрицательной половине $u_{вх}$ отрицательное смещение на сетке возрастает — ($U_{см} + u_{вх}$), уменьшая анодный ток лампы. Таким образом, кривые анодного тока i_a и напряжения на анодной нагрузке u_R изменяются в фазе с входным напряжением $u_{вх}$, а анодное напряжение лампы u_a , являющееся напряжением на выходе усилителя $u_a = u_{вых} = E_a - u_R$, изменяется в противофазе с напряжением $u_{вх}$, т. е. усилительный каскад с активной нагрузкой изменяет фазу напряжения на π или на 180° .

В рассмотренной схеме усилительного каскада весьма незначительные колебания входного напряжения $u_{вх}$ вызывают также малые изменения потенциала сетки лампы и достаточно большие изменения анодного тока, т. е. на выходе усилителя будут получены электрические колебания значительно большей мощности. Усиление электрических колебаний будет тем большим, чем больше крутизна анодно-сеточной характеристики лампы.

Транзисторные усилители наиболее часто работают по схеме с общим эмиттером (рис. 181), так как эта схема обеспечивает достаточно большое входное сопротивление и коэффициент усиления. Эта схема транзисторного усилителя эквивалентна схеме усилителя на электронной лампе. Изменение потенциала базы под действием входного напряжения $u_{вх}$ вызывает изменение как коллекторного тока i_k , так и напряжения эмиттер — коллектор $u_{эк}$, являющегося выходным. В этой схеме коэффициенты усиления по току $K_i = \beta = \Delta I_{вых} / \Delta I_{вх} = \Delta I_k / \Delta I_b$, по напряжению $K_U = \Delta u_{вых} / \Delta u_{вх}$, по мощности $K_P = \Delta P_{вых} / \Delta P_{вх} = K_i K_U$.

Для нормальной работы транзистора между эмиттером и базой должно быть постоянное напряжение смещения (десять доли

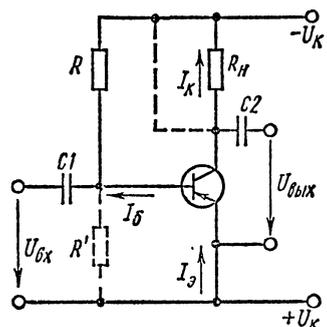


Рис. 181. Схема транзисторного усилителя напряжения по схеме с общим эмиттером

вольта). На рис. 181 для получения напряжения смещения базы применен резистор R , включенный между базой и отрицательным полюсом источника питания U_K .

Для получения напряжения смещения базы может быть использован делитель напряжения RR' , как показано на схеме рис. 181 прерывистой линией.

Как было сказано выше, температура в сильной степени влияет

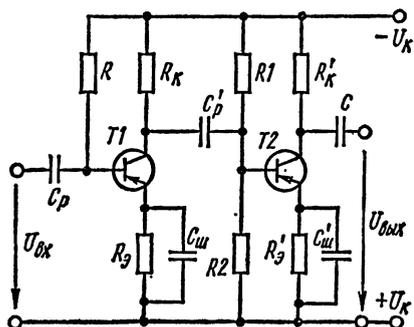


Рис. 182. Схема двухкаскадного транзисторного усилителя с резистивно-емкостной связью

на параметры и работу полупроводниковых приборов. Так, например, повышение температуры вызывает увеличение токов и изменяет режим работы транзисторов. Для уменьшения влияния изменения температуры на режим работы транзисторов применяют температурную стабилизацию. На схеме усилителя, приведенной на рис. 181, может быть использована коллекторная температурная стабилизация, если резистор R , необходимый для получения смещения напряжения базы подключить к коллектору транзистора, как показано на схеме прерывистой линией.

В этом случае повышение температуры вызовет увеличение тока коллектора I_K и возрастет падение напряжения в коллекторной нагрузке, что уменьшает напряжение эмиттер — коллектор и эмиттер — база и, следовательно, уменьшает ток коллектора I_K до начального значения.

Помимо влияния температуры отрицательным свойством транзисторов является ухудшение их усилительных свойств с повышением частоты. Неосновные носители проходят через базу не мгновенно, и инжектированные в базу в один и тот же момент неосновные носители достигают коллекторного перехода в разное время, вследствие чего уменьшается амплитуда и искажается форма выходного сигнала. Вместе с этим происходит запаздывание по фазе между коллекторным и эмиттерным токами. Кроме того, с ростом частоты емкость коллекторного перехода шунтирует его сопротивление, что уменьшает коэффициент передачи.

По этим причинам с повышением частоты уменьшается коэффициент усиления по току α и частота, при которой он достигает величины 0,707 своего начального значения, называется граничной частотой.

Если для получения заданного коэффициента усиления одного усилительного каскада недостаточно, применяют многокаскадные усилители. На рис. 182 показана схема двухкаскадного транзисторного усилителя с резистивно-емкостной связью между каскадами. Разделительный конденсатор C_p предназначен для отделения постоянной составляющей напряжения смещения базы от источника входного напряжения. Напряжение смещения на базу первого транзистора $T1$ подается через резистор R .

Температурная стабилизация первого, так же как второго каскада, осуществляется резисторами R_3 и R'_3 (эмиттерная стабилизация). Эти резисторы создают обратную связь по постоянному току. Если с повышением температуры увеличатся токи транзисторов, то возрастет падение напряжения в резисторах R_3 и R'_3 , а в связи с этим понизятся потенциалы эмиттеров транзисторов, что уменьшит напряжение смещения базы и вызовет уменьшение токов. Коллекторными нагрузками являются резисторы R_k и R'_k . Конденсатор C_p является разделительным между первым и вторым каскадами. Второй каскад отличается от первого тем, что смещение базы фиксируется делителем напряжения с резисторами R_1 и R_2 . Конденсатор C задерживает постоянную составляющую тока из коллекторной цепи в нагрузку на выходе второго каскада.

§ 124. Генераторы гармонических колебаний

Для получения переменных токов высокой частоты служат ламповые генераторы, которые преобразуют энергию постоянного тока в электрическую энергию переменного тока заданной частоты. По способу возбуждения колебаний генераторы подразделяются на генераторы с независимым возбуждением и генераторы с самовозбуждением или автогенераторы. В генераторах с независимым возбуждением переменное напряжение заданной частоты подается от постороннего источника и генераторы являются усилителями мощности гармонических колебаний. В генераторах с самовозбуждением незатухающие колебания создаются под воздействием выходной цепи генератора на его входную цепь через положительную обратную связь.

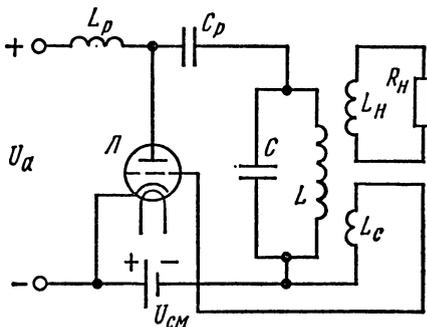


Рис. 183. Схема лампового генератора типа LC.

На рис. 183 изображена схема лампового генератора с самовозбуждением, содержащая колебательный контур LC. Если зарядить конденсатор C , а затем замкнуть его на катушку индуктивности L , то конденсатор будет периодически разряжаться и заряжаться, а в цепи колебательного контура возникнут электрические колебания тока и напряжения с частотой, зависящей от емкости конденсатора C и индуктивности катушки L , т. е. $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$, где ω_0 — собственная угловая частота контура. Эти колебания будут затухающими, так как в контуре происходит потеря энергии. Для получения незатухающих колебаний переменного тока необходимо периодически с определенной частотой добавлять энергию в колебательный контур с тем, чтобы компенсировать потери энергии в нем. Триод Λ является быстродействующим устройством, позволяющим добавлять в колебательный контур необходимую энергию. Переменный ток, возника-

ющий в колебательном контуре и проходящий по виткам катушки L , возбуждает переменное магнитное поле, которое индуцирует в обмотке L_c переменную эдс e_c с частотой тока колебательного контура. Эта эдс воздействует на сетку лампы и управляет током в цепи ее анода. При положительном значении эдс катушки обратной связи она уменьшит отрицательное смещение на сетке лампы $-(U_{cm}-e_c)$ и анодный ток увеличится, при отрицательном значении эдс e_c она увеличит отрицательное смещение на сетке лампы $-(U_{cm}+e_c)$ и уменьшит анодный ток. Таким образом, анодный ток лампы будет пульсирующим, изменяющимся от наибольшего до наименьшего значения с частотой, равной частоте эдс обмотки обратной связи, т. е. частоте тока колебательного контура. При этом наибольшее значение анодный ток принимает в момент, когда эдс e_c имеет максимальное положительное значение, т. е. e_c совпадает по фазе с переменной составляющей анодного тока и, следовательно, обратная связь положительная.

Постоянная составляющая анодного тока не может пройти в колебательный контур, так как этому препятствует разделительный конденсатор C_p , и замкнется через источник питания и разделительную индуктивность L_p , которая установлена, чтобы переменная составляющая не шунтировалась источником питания.

При высокой частоте индуктивное сопротивление разделительной индуктивности $\omega_0 L_p$ велико и оно препятствует прохождению переменной составляющей анодного тока, замыкающейся через колебательный контур.

Для возбуждения незатухающих колебаний переменная составляющая анодного тока лампы должна быть достаточной, чтобы компенсировать потери энергии в контуре. В противном случае колебания будут затухающими и генератор работать не сможет. В результате магнитной связи незатухающие колебания передаются в выходную обмотку L_n , откуда поступают в нагрузку R_n .

На рассмотренной схеме автогенератора между колебательным контуром и сеткой лампы использована трансформаторная обратная связь. Автогенераторы могут быть также с индуктивной и с емкостной обратной связью.

§ 125. Реле

В схемах питания, управления и защиты электронных устройств широко применяются реле — приборы, в которых плавное изменение входных параметров приводит к скачкообразному изменению выходных величин. Если входным параметром является величина X (например, ток), а выходным — Y (например, напряжение), то характеристика прибора, обладающего релейным эффектом, имеет вид, показанный на рис. 184. При изменении входного параметра X от нуля до значения X_1 выходной параметр остается неизменным и равным Y_1 . При $X=X_1$ параметр Y скачкообразно изменяется до значения Y_2 и остается неизменным при дальнейшем увеличении X . Уменьшение

параметра X также не изменяет величины Y_2 , но при $X=X_2$ параметр Y скачкообразно уменьшается и принимает первоначальное значение Y_1 .

Так, например, работа широко распространенного электромагнитного реле основана на электромеханическом действии тока. При увеличении тока до определенной величины сила воздействия на якорь становится достаточной для преодоления силы противодействующей пружины и якорь изменяет свое положение, переключая контакты. С уменьшением тока до величины, при которой электромагнитная сила становится меньше силы противодействующей пружины, якорь возвращается в исходное положение.

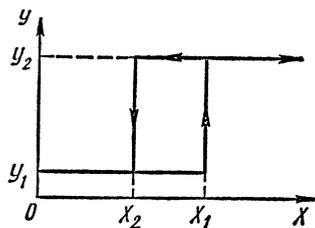


Рис. 184. Характеристика релейного элемента

Таким образом, работу реле характеризуют две величины входного параметра (в рассмотренном случае тока): ток срабатывания и ток отпускания, а все промежуточные значения тока не приводят к изменению состояния реле. Ток срабатывания реле больше тока отпускания. В рассмотренном электромагнитном реле после притяжения якоря воздушный зазор становится минимальным, для удержания якоря требуется малый ток и для отпускания реле ток в обмотке необходимо уменьшить по сравнению с током срабатывания. Отношение входного параметра при отпускании реле X_2 к величине этого параметра при срабатывании X_1 называется коэффициентом возврата реле ($K_B=X_2/X_1$), который всегда меньше единицы.

Реле состоит из воспринимающего органа, предназначенного для восприятия входного параметра, и исполнительного органа, который формирует выходные параметры. Для электромагнитного реле такими элементами являются катушка электромагнита и контакты. Воздействие на воспринимающий орган приводит к изменению состояния исполнительного органа через определенное время, называемое временем срабатывания или временем отпускания реле. Время срабатывания, или отпускания, реле складывается из времени трогания и времени движения. Временем трогания называется отрезок времени, прошедший от момента включения или выключения цепи воспринимающего органа до начала перемещения подвижной части реле. Это время зависит от постоянной времени реле. Вре́мя движе́ния — промежуток времени от начала перемещения подвижной части до замыкания или размыкания контактов; это время зависит от конструктивных свойств реле: массы якоря, его входа, тяговых усилий и т. д.

Время срабатывания и отпускания реле можно изменить как конструктивными, так и схемными мерами. Для замедления срабатывания и отпускания реле на его сердечнике помещают массивную медную гильзу (кольцо), которую располагают для замедления на притяжение впереди катушки (со стороны якоря), а для замедления на отпускание — сзади катушки. Индуктируемый в гильзе ток удержи-

вает нарастание или спадание магнитного потока, в результате этого замедляется перемещение якоря.

Схема включения реле для замедления срабатывания и отпущания реле показана на рис. 185, а. При включении конденсатор C , шунтируя обмотку реле, задерживает увеличение тока в ней, а при

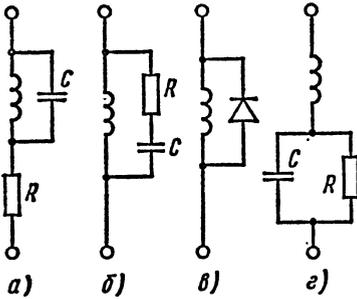


Рис. 185. Схемы включения реле: а — для замедления срабатывания и отпущания, б и в — для замедления отпущания, г — для ускорения срабатывания

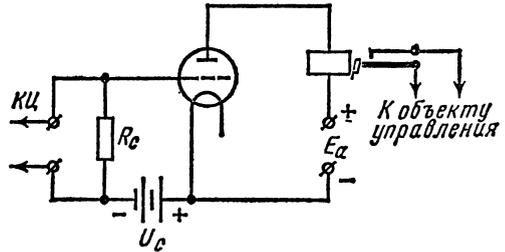


Рис. 186. Схема электронного реле

выключении конденсатор, разряжаясь на обмотку, замедляет уменьшение тока. Для замедления работы реле на отпущание служит схема рис. 185, б; запасенная в конденсаторе энергия задерживает уменьшение тока в обмотке реле. Так же замедление на отпущание обеспечит схема с включением диода параллельно обмотке реле в непроводящем направлении (рис. 185, в). При отключении реле в его обмотке будет поддерживаться ток под воздействием эдс самоиндукции. Для ускорения срабатывания реле может быть использована схема, изображенная на рис. 185, г. В момент включения ток проходит через конденсатор, представляющий для него малое сопротивление, и реле быстрее срабатывает.

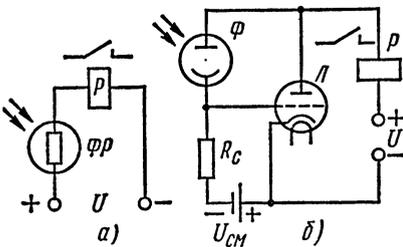


Рис. 187. Схемы фотореле: а — с фоторезистором, б — с ламповым усилителем

реле — наиболее ненадежные их части. Бесконтактные реле имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с контактными, как-то: большая точность, чувствительность, быстродействие, надежность и долговечность.

К бесконтактным реле относятся электронные переключающие устройства, называемые спусковыми или триггерами.

Контактные реле преобразуют входную величину в механическое действие, результатом которого является замыкание или размыкание выходной цепи. К контактной группе реле относятся электромеханические реле с электронными усилителями.

Электронное реле (рис. 186) представляет собой электронный усилитель на триоде, в анодную цепь которого включено электромагнитное реле P . При подаче на сетку небольшого положительного напряжения от контролируемой цепи $KЦ$, подключенного к ней, анодный ток вследствие усилительных свойств лампы значительно увеличивается. Электромагнитное реле срабатывает, переключает свои контакты и включает, отключает или переключает устройства, которыми оно управляет.

Управление электромагнитным реле может осуществляться транзисторами, тиратронами, фотоэлементами и др.

Фотореле является автоматическим устройством, реагирующим на изменение светового потока. Простейшее фотореле обычно последовательно соединяют с фоторезистором (рис. 187, *а*), которые включают в сеть с напряжением U . При неосвещенном фоторезисторе сопротивление его велико (примерно 1 МОм) и ток в цепи мал. Освещение фоторезистора вызывает уменьшение его сопротивления и увеличение тока в цепи. При некотором значении тока в цепи срабатывает электромагнитное реле P , замыкая или размыкая контакты в управляемой цепи.

В случаях, когда чувствительность фотореле с фоторезисторами оказывается недостаточной, применяют фотореле с электронными усилителями (рис. 187, *б*). При затемненном фотоэлементе его фототок равен нулю и на сетку усилительной лампы подается отрицательное смещение $U_{см}$, запирающее лампу. При освещении фотоэлемента появляется фототок, который создает на резисторе R_c падение напряжения, которое уменьшает отрицательное смещение на сетке усилительной лампы, отпирая ее. В результате анодный ток лампы и ток в обмотке реле P повышаются. По мере увеличения освещенности фотоэлемента возрастает ток в анодной цепи и при достижении некоторого значения происходит срабатывание реле P .

Контрольные вопросы

1. Объясните работу однофазной мостовой схемы выпрямления.
2. Чему равно обратное напряжение в двухполупериодной, мостовой и трехфазной схемах выпрямления?
3. Как определяется коэффициент сглаживания для различных типов сглаживающих фильтров?
4. Изобразите схему включения газоразрядных и кремниевых стабилитронов.
5. Какими основными параметрами характеризуется усилитель?
6. Объясните работу схемы лампового усилителя.
7. Как определяется коэффициент усиления транзисторного усилителя при схеме с общим эмиттером?
8. В чем заключается принцип работы лампового $L-C$ генератора?

Литература

К а с а т к и н А. С. Основы электротехники.— М.: Высшая школа, 1975.

К и т а е в В. Е., Ш л я п и н т о х Л. С. Электротехника с основами промышленной электроники.— М.: Высшая школа, 1973.

З о р о х о в и ч А. Е., К а л и н и н В. К. Электротехника с основами промышленной электроники.— М.: Высшая школа, 1975.

К у з н е ц о в М. Н. Основы электротехники.— М.: Высшая школа, 1972.

З о р о х о в и ч А. Е., К р ы л о в С. К. Основы электротехники для локомотивных бригад.— М.: Транспорт, 1970.

Г у с е в Н. Н., М е л ь ц е р Б. И. Электротехника и основы промышленной электроники.— Минск: Высшая школа, 1969.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие		3
Глава I.	Основы электростатики	5
§	1. Понятие о строении вещества	5
§	2. Электрическое поле. Закон Кулона	6
§	3. Напряженность электрического поля. Потенциал	8
§	4. Проводники и диэлектрики	10
§	5. Электрическая емкость	10
§	6. Заряд и разряд конденсатора	12
§	7. Устройство конденсаторов	14
§	8. Соединение конденсаторов	16
Глава II.	Постоянный ток и цепи постоянного тока	18
§	9. Электрическая цепь постоянного тока	18
§	10. Электродвижущая сила	19
§	11. Электрическое сопротивление	20
§	12. Закон Ома	21
§	13. Последовательное соединение резисторов	23
§	14. Первый закон Кирхгофа	24
§	15. Параллельное и смешанное соединение резисторов	25
§	16. Второй закон Кирхгофа	27
§	17. Расчет сложных электрических цепей	28
§	18. Работа и мощность электрического тока	31
§	19. Закон Ленца — Джоуля	32
§	20. Нагревание проводников электрическим током. Расчет сечения проводов	33
§	21. Химическое действие электрического тока	35
§	22. Гальванические элементы	36
§	23. Аккумуляторы	38
§	24. Нелинейные сопротивления	41
Глава III.	Магнетизм и электромагнетизм	44
§	25. Магниты и их свойства	44
§	26. Магнитное поле электрического тока	45
§	27. Проводник с током в магнитном поле. Магнитная индукция	46
§	28. Напряженность магнитного поля. Закон полного тока	48
§	29. Магнитная проницаемость. Магнитный поток	49
§	30. Взаимодействие проводников с токами	50
§	31. Гистерезис	51
§	32. Электромагниты	54
§	33. Электромагнитная индукция	55
§	34. Вихревые токи	58
§	35. Самоиндукция	58
§	36. Расчет индуктивности	60
§	37. Энергия магнитного поля	61
§	38. Взаиминдукция	62

Глава IV. Переменный ток и цепи переменного тока	64
§ 39. Получение переменной электродвижущей силы	64
§ 40. Синусоидальная электродвижущая сила	66
§ 41. Активное сопротивление в цепи переменного тока	68
§ 42. Действующие значения тока и напряжения	70
§ 43. Катушка индуктивности в цепи переменного тока	70
§ 44. Цепь переменного тока, содержащая активное и индуктивное сопротивления	72
§ 45. Емкость в цепи переменного тока	73
§ 46. Цепь переменного тока, содержащая активное и емкостное сопротивления	75
§ 47. Цепь переменного тока, содержащая активное, индуктивное и емкостное сопротивления	76
§ 48. Параллельное соединение реактивных сопротивлений. Резонанс токов	78
§ 49. Мощность переменного тока	81
Глава V. Трехфазная система переменного тока	84
§ 50. Трехфазные генераторы	84
§ 51. Соединение обмоток генератора	85
§ 52. Включение нагрузки в сеть трехфазного тока	88
§ 53. Защита трехфазной сети предохранителями	90
§ 54. Мощность трехфазной цепи	91
§ 55. Вращающееся магнитное поле	93
Глава VI. Электрические измерения и электроизмерительные приборы	97
§ 56. Общие сведения и классификация приборов	97
§ 57. Приборы электромагнитной системы	101
§ 58. Приборы магнитоэлектрической системы	104
§ 59. Приборы электродинамической системы	105
§ 60. Приборы индукционной системы	106
§ 61. Приборы вибрационной системы	107
§ 62. Измерение силы тока и напряжения	108
§ 63. Измерение сопротивлений	110
§ 64. Логометры	112
§ 65. Измерение мощности и энергии	113
§ 66. Измерение неэлектрических величин	114
§ 67. Цифровые приборы	115
Глава VII. Трансформаторы	117
§ 68. Общие сведения о трансформаторах	117
§ 69. Принцип действия и устройство трансформатора	118
§ 70. Работа трансформатора под нагрузкой	121
§ 71. Трехфазные трансформаторы	123
§ 72. Опыты холостого хода и короткого замыкания	125
§ 73. Определение рабочих свойств трансформаторов по данным опытов холостого хода и короткого замыкания	127
§ 74. Автотрансформаторы	129
§ 75. Измерительные трансформаторы	131
Глава VIII. Асинхронные двигатели	133
§ 76. Общие сведения об электрических машинах	133
§ 77. Принцип действия асинхронного двигателя	134
§ 78. Устройство асинхронного двигателя	136
§ 79. Работа асинхронного двигателя под нагрузкой	138

§ 80.	Вращающий момент асинхронного двигателя	140
§ 81.	Рабочие характеристики асинхронного двигателя	142
§ 82.	Пуск в ход асинхронных двигателей	144
§ 83.	Двигатели с улучшенными пусковыми свойствами	145
§ 84.	Регулирование частоты вращения трехфазных асинхронных двигателей	147
§ 85.	Однофазные асинхронные двигатели	149
Глава IX. Синхронные машины		151
§ 86.	Принцип действия синхронного генератора	151
§ 87.	Устройство синхронного генератора	152
§ 88.	Работа синхронного генератора под нагрузкой	154
§ 89.	Синхронные двигатели	157
Глава X. Машины постоянного тока		160
§ 90.	Принцип действия и устройство генератора постоянного тока	160
§ 91.	Обмотки якорей и эдс машины постоянного тока	163
§ 92.	Магнитное поле машины постоянного тока при нагрузке	166
§ 93.	Коммутация тока	167
§ 94.	Работа машины постоянного тока в режиме генератора	169
§ 95.	Способы возбуждения генераторов постоянного тока	171
§ 96.	Характеристики генераторов постоянного тока	173
§ 97.	Работа машины постоянного тока в режиме двигателя	178
§ 98.	Пуск двигателей постоянного тока	180
§ 99.	Характеристики двигателей постоянного тока	182
§ 100.	Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока	184
§ 101.	Потери и КПД машин постоянного тока	185
Глава XI. Электронные приборы		187
§ 102.	Электронная эмиссия	187
§ 103.	Электроды электровакуумных ламп	188
§ 104.	Двухэлектродные электронные лампы (диоды)	192
§ 105.	Трехэлектродные электронные лампы (триоды)	195
§ 106.	Четырехэлектродные электронные лампы (тетроды)	198
§ 107.	Пятиэлектродная лампа (пентод), комбинированные и многосеточные лампы	200
§ 108.	Электронно-лучевые трубки	201
§ 109.	Осциллограф	203
Глава XII. Полупроводниковые приборы		205
§ 110.	Электропроводность полупроводников	205
§ 111.	Полупроводниковые диоды	207
§ 112.	Транзисторы	211
§ 113.	Тиристоры	216
Глава XIII. Газоразрядные приборы и фотоэлементы		219
§ 114.	Ионизация газа и электрический разряд	219
§ 115.	Газотрон	221
§ 116.	Тиратрон	223
§ 117.	Ртутные вентили	225
§ 118.	Фотоэлементы с внешним фотоэффектом. Фотоумножители	226

§ 119. Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом и с запирающим слоем	229
Г л а в а XIV. Устройства промышленной электроники	233
§ 120. Выпрямители	233
§ 121. Сглаживающие фильтры	237
§ 122. Стабилизаторы напряжения	239
§ 123. Усилители низкой частоты	241
§ 124. Генераторы гармонических колебаний	245
§ 125. Реле	246
Литература	250

Валентин Евгеньевич Китаев
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
С ОСНОВАМИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Научный редактор Г. П. Андреев
Редактор Г. А. Сильвестрович
Художественный редактор Т. В. Панина
Технический редактор Л. А. Муравьева
Корректор М. М. Малиновская

ИБ № 2380

Изд. № ЭГ-350. Сдано в набор 14.11.79. Подп. в печать 08.04.80. Т-08415. Формат 60×90/16. Бум. тип. № 1. Гарнитура литературная. Печать высокая. Объем 16 усл. печ. л. 17,04 уч.-изд. л. Тираж 320000 экз. Заказ № 902. Цена 55 коп.

Издательство «Высшая школа»,
Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14
Ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени
Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-54, Валовая, 28

**Издательство «Высшая школа»
выпустит в свет в 1980 г.
для учащихся
средних
профессионально-технических
училищ
следующие учебники
и учебные пособия:**

Гетлинг Б. В. Чтение схем и чертежей электроустановок: Учебник.— 6-е изд., испр.— 8 л., ил.— 25 к.

Рассмотрены назначение, классификация и условные обозначения электрических схем и чертежей электроустановок; дано описание этих схем и чертежей.

Шестое издание книги (5-е — в 1977 г.) исправлено в связи с изменениями в ГОСТах.

Для средних профтехучилищ электроэнергетического профиля.

Перельмутер Н. М. Электромонтер-обмотчик и изолировщик по ремонту электрических машин: Учебник.— 14 л., ил.— 35 к.

Подробно рассмотрена технология выполнения обмоточных и изолировочных работ при ремонте электрических машин, дано описание применяемых при этом приемов, приспособлений и оборудования.

Приведены также сведения об устройстве наиболее распространенных типов электрических машин, схемах обмоток, методах их построения и конструктивных особенностях, проводниковых и изоляционных материалах, используемых при ремонте электрических машин.

Для подготовки в технических училищах электромонтеров-обмотчиков и изолировщиков, занятых ремонтом электрических машин.

Расовский В. Э., Котов Г. И. Ремонт измерительных электроприборов: Учеб. пособие.— 8 л., ил.— 25 к.

Рассмотрен ремонт деталей и узлов измерительных электроприборов, дано описание их сборки и регулировки. Кратко изложены сведения об организации ремонта измерительных электроприборов, о применяемых инструментах, приспособлениях и устройствах.

Для средних профтехучилищ, готовящих слесарей-механиков измерительных электроприборов.

Уважаемые читатели!

Издательство «Высшая школа» выпускает учебники, учебные и методические пособия, плакаты. Подробнее познакомиться с учебной литературой вам поможет аннотированный план выпуска литературы на 1980 год (профтехобразования), который имеется в книжных магазинах.

Предварительные заявки на книги вы можете сделать в магазинах Книго-торга или потребительской кооперации.

65 коп

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА С ОСНОВАМИ
ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

В. Е. КУТАЕВ •