

Учебники XXI века

Ю. Г. Синдеев

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

с основами электроники

*Учебное пособие для профессиональных
училищ и колледжей*

*Соответствует государственному стандарту
начального профессионального образования*

Ростов-на-Дону

4 1337123
"Феникс"
Вологодская областная
универсальная
научная библиотека

Введение

Электротехника – это наука о процессах, связанных с практическим применением электрических и магнитных явлений. Так же называют отрасль техники, которая применяет их в промышленности, медицине, военном деле и т. д.

Большое значение электротехники во всех областях деятельности человека объясняется преимуществами электрической энергии перед другими видами энергии, а именно:

◆ электрическую энергию легко преобразовать в другие виды энергии (механическую, тепловую, световую, химическую и др.), и наоборот, в электрическую энергию легко преобразуются любые другие виды энергии;

◆ электрическую энергию можно передавать практически на любые расстояния. Это дает возможность строить электростанции в местах, где имеются природные энергетические ресурсы, и передавать электрическую энергию в места, где расположены источники промышленного сырья, но нет местной энергетической базы;

♦ электрическую энергию удобно дробить на любые части в электрических цепях (мощность приемников электроэнергии может быть от долей ватта до тысяч киловатт);

♦ процессы получения, передачи и потребления электроэнергии легко поддаются автоматизации;

♦ процессы, в которых используется электрическая энергия, допускают простое управление (нажатие кнопки, выключателя и т. д.).

Особо следует отметить существенное удобство применения электрической энергии при автоматизации производственных процессов, благодаря точности и чувствительности электрических методов контроля и управления. Использование электрической энергии позволило повысить производительность труда во всех областях деятельности человека, автоматизировать почти все технологические процессы в промышленности, на транспорте, в сельском хозяйстве и в быту, а также создать комфорт в производственных и жилых помещениях. Кроме того, электрическую энергию широко используют в технологических установках для нагрева изделий, плавления металлов, сварки, электролиза, получения плазмы, получения новых материалов с помощью электрохимии, очистки материалов и газов и т. д.

В настоящее время электрическая энергия является практически единственным видом энергии для искусственного освещения. Можно сказать, что без электрической энергии невозможна нормальная жизнь современного общества.

Единственным недостатком электрической энергии является невозможность запастись ее в больших количествах и сохранять эти запасы в течение длительного времени. Запасы электрической энергии в аккумуляторах, гальванических элементах и кон-

денсаторах достаточны лишь для работы сравнительно маломощных устройств, причем сроки ее сохранения ограничены. Поэтому электрическая энергия должна быть произведена тогда, когда ее требует потребитель, и в том количестве, в котором она ему необходима.

Непрерывное расширение области применения электрической энергии влечет за собой глубокое внедрение электротехники во все отрасли промышленности, сельского хозяйства и быта, а это требует дальнейшего подъема электровооруженности труда, широкой автоматизации производственных процессов и использования автоматизированных систем управления.

Эти обстоятельства требуют обеспечения такой профессиональной подготовки специалистов, при которой они будут располагать системой знаний, умений и навыков в актуальных для них областях электротехники.

Глава 1. Основы электростатики

1.1 Строение вещества

Все вещества, как простые, так и сложные, состоят из молекул, а молекулы из атомов.

Наименьшая частица вещества, которая еще сохраняет его свойства, называется *молекулой*. Молекула – это химическая комбинация двух или более атомов. *Атом* – это наименьшая частица элемента, которая сохраняет химические характеристики элемента. *Химический элемент* – составная часть вещества, построенная из одинаковых атомов.

Простые вещества – медь, алюминий, цинк, свинец и др. – состоят из одинаковых атомов данного вещества. Молекулы *сложных веществ* могут состоять из нескольких атомов различных химических элементов. Например, поваренная соль (хлористый натрий) состоит из атомов хлора и атомов натрия. Молекулы воды содержат атомы водорода и атомы кислорода.

Физическая комбинация элементов и соединений называется *смесью*. Примерами смесей является воздух, который состоит из кислорода, азота, углекислого газа и других газов, и соленая вода, которая состоит из соли и воды.

Атом состоит из протонов, нейтронов и электронов. Протоны и нейтроны сгруппированы в центре атома и образуют ядро. Протоны заряжены положительно, а нейтроны не имеют электрического заряда. Электроны расположены на оболочках на различных расстояниях от ядра.

Атомы различных элементов отличаются друг от друга. Поскольку существует свыше 100 различных элементов, то существует и свыше 100 различных атомов.

Количество протонов в ядре атома называется *атомным номером* элемента, т.е. номером элемента в периодической таблице Д.И. Менделеева. Атомные номера позволяют отличить один элемент от другого.

Каждый элемент имеет также *атомную массу*. Атомная масса определяется общим числом протонов и нейтронов в ядре. Электроны почти не дают вклада в общую массу атома; масса электрона составляет только $1/1836$ часть от массы протона, и этого недостаточно, чтобы ее учитывать.

Электроны вращаются вокруг ядра по замкнутым орбитам. Каждая орбита называется оболочкой. Оболочки обозначаются буквами K, L, M, N и т. д. Оболочки заполняются постепенно, по мере увеличения атомного номера элемента, в следующей последовательности: сначала заполняется оболочка K, затем L, M, N и т. д. В некоторых случаях этот порядок нарушается: например, оболочка N начинает заполняться при не полностью заполненной оболочке M. Максимальное количество электронов, которое может разместиться на каждой оболочке, показано в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Обозначения оболочек	Общее количество электронов
К	2
L	8
M	18
N	32
O	32
P	14
Q	2

В качестве примера рассмотрим строение атома алюминия, имеющего № 13 в таблице Менделеева и атомную массу 27 (рис. 1.1).

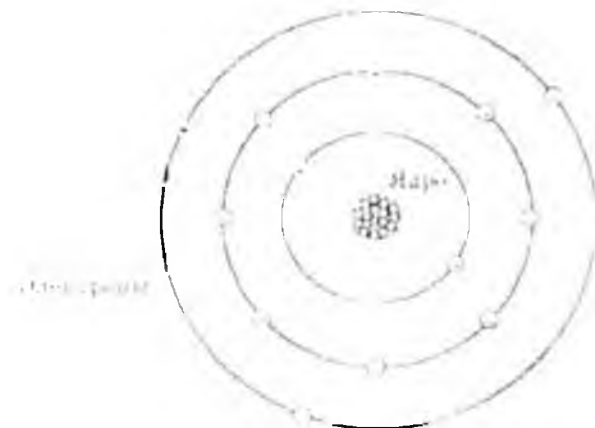


Рис. 1.1

Ядро атома алюминия содержит 13 протонов и 14 нейтронов ($13 + 14 = 27$). Тринадцать электронов атома алюминия размещены на трех электронных оболочках: на оболочке К – 2 электрона, на оболочке L – 8 электронов и на наиболее удаленной от ядра внешней оболочке M – 3 электрона.

Внешняя оболочка называется *валентной* и количество электронов, которое она содержит, называется *валентностью*. Чем дальше от ядра валентная оболочка, тем меньшее притяжение со стороны ядра испытывает каждый валентный электрон. Таким образом, потенциальная возможность атома присоединять или терять электроны увеличивается, если валентная оболочка не заполнена и расположена достаточно далеко от ядра.

Электроны валентной оболочки могут получать энергию. Если эти электроны получают достаточно энергии от внешних сил, то они могут покинуть атом и стать свободными электронами, произвольно перемещаясь от атома к атому.

Материалы, которые содержат большое количество свободных носителей заряда, называются *проводниками*. Проводниками являются все металлы, растворы электролитов, расплавы многих веществ и ионизированные газы. Самой высокой проводимостью среди металлов обладает серебро; далее в порядке убывания проводимости идут медь, золото и алюминий. И серебро, и медь, и золото имеют валентность, равную единице. Однако серебро является лучшим проводником, поскольку его свободные электроны более слабо связаны.

Диэлектрики (изоляторы) в противоположность проводникам препятствуют протеканию электричества. В диэлектриках свободные электроны отсутствуют благодаря тому, что валентные электроны одних атомов присоединяются к другим атомам,

заполняя их валентные оболочки и препятствуя, таким образом, образованию свободных электронов. Диэлектриками являются различные пластмассы, слюда, фарфор, стекло, мрамор, резина, различные смолы, лаки и другие материалы.

Промежуточное положение между проводниками и изоляторами занимают *полупроводники*. Полупроводники не являются ни хорошими проводниками, ни хорошими изоляторами, но они играют важную роль в электронике, потому что их проводимость можно изменять от проводника до изолятора. Кремний и германий являются полупроводниковыми материалами.

Об атоме, который имеет одинаковое число электронов и протонов, говорят, что он электрически нейтрален. Атом, получивший один или более электронов, не является электрически нейтральным. Он становится отрицательно заряженным и называется *отрицательным ионом*. Если атом теряет один или более электронов, то он становится положительно заряженным и называется *положительным ионом*. Процесс присоединения или потери электронов называется *ионизацией*. Ионизация играет большую роль в протекании электрического тока.

1.2. Электрические заряды. Закон Кулона.

Электрическое поле. Принцип суперпозиции

Еще в глубокой древности было известно, что янтарь, потертый о шерсть, приобретает способность притягивать легкие предметы. Позже было установлено, что аналогичным свойством обладают многие другие вещества. Тела, способные, подобно янтарию, после натирания притягивать легкие предметы, называют наэлектризованными. Теперь мы говорим,

что на телах в таком состоянии имеются электрические заряды, а сами тела называем заряженными.

В природе существуют только два вида зарядов — положительные и отрицательные. Заряды одного знака (одноименные заряды) отталкиваются, заряды разных знаков (разноименные заряды) притягиваются. Наименьшим (элементарным) зарядом обладают элементарные частицы. Например, протон и позитрон заряжены положительно, электрон и антипротон — отрицательно. Элементарный отрицательный заряд по величине равен элементарному положительному заряду. В системе СИ заряд измеряется в *кулонах* (Кл). Величина элементарного заряда $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.

В природе нигде и никогда не возникает и не исчезает электрический заряд одного знака. Появление положительного электрического заряда $+q$ всегда сопровождается появлением равного по абсолютной величине отрицательного электрического заряда $-q$. Ни положительный, ни отрицательный заряды не могут исчезнуть по отдельности один от другого, они могут лишь взаимно нейтрализовать друг друга, если равны по абсолютной величине.

Этот экспериментально установленный факт называется законом сохранения электрического заряда, который формулируется следующим образом: *в электрически изолированной системе алгебраическая сумма зарядов остается постоянной:*

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const.} \quad (1.1)$$

Изолированной называется система, не обменивающаяся зарядами с внешней средой.

В 1785 г. Шарль Кулон (1736–1806) экспериментально, с помощью крутильных весов, установил закон взаимодействия двух точечных зарядов, т.е. та-

ких заряженных тел, размерами которых в данной задаче можно пренебречь. Этот закон гласит: *сила взаимодействия двух точечных зарядов прямо пропорциональна произведению этих зарядов, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и направлена по линии, соединяющей эти заряды.* Для вакуума этот закон имеет вид

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (1.2)$$

где $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/\text{Н} \cdot \text{м}^2 (\text{Ф}/\text{м})$ – электрическая постоянная. В диэлектрике сила взаимодействия двух точечных зарядов

$$F' = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2} q_1 q_2, \quad (1.3)$$

где $\epsilon = F / F' > 1$ – диэлектрическая проницаемость диэлектрика. Она показывает, во сколько раз сила кулоновского взаимодействия зарядов в диэлектрике меньше, чем в вакууме.

Взаимодействие между зарядами на расстоянии осуществляется через электрическое поле.

Электрическое поле – это одна из форм материи. Оно обладает свойством действовать на внесенные в него заряды с некоторой силой. Электрическое поле является составной частью электромагнитного поля. Поле, окружающее неподвижные заряды, называется *электростатическим*.

Представление об электрическом поле было введено в науку в 30-х г.г. XIX в. Майклом Фарадеем (1791–1867). Согласно Фарадею, каждый электрический заряд окружен созданным им электрическим полем. Заряд, с помощью которого исследуют это электрическое поле, называют пробным зарядом.

Пусть заряд q создает электрическое поле. Будем помещать в точку M электрического поля различные пробные заряды $q_{пр}$ (рис. 1.2).



Рис. 1.2

На каждый из них электрическое поле действует с различными силами. Но если величину каждой силы разделить на соответствующий ей пробный заряд, то получим одно и то же значение, характерное для точки M этого поля. Таким образом, величина, равная силе, действующей на единичный пробный заряд в точке M , может служить силовой характеристикой электрического поля. Она называется *напряженностью электрического поля*:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{пр}} \quad (1.1)$$

Напряженность электрического поля – векторная величина. Направление вектора \vec{E} совпадает с направлением вектора силы \vec{F} , действующей на положительный пробный заряд, помещенный в данную точку поля. Напряженность не зависит от наличия или отсутствия в данном поле пробных зарядов. Она зависит от свойств самого поля, которые определяются зарядом-источником, расстоянием от

него до точки поля, в которой измеряется напряженность и средой, в которой создано поле. В системе СИ напряженность электрического поля измеряется в *вольтах на метр* (В/м).

Пусть имеется положительный точечный заряд — источник поля Q . Поместим в некоторую точку поля M этого заряда положительный пробный заряд $q_{пр}$. На этот заряд будет действовать сила

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq_{пр}}{r^2}. \quad (1.5)$$

Тогда напряженность поля, создаваемого точечным зарядом Q в точке M ,

$$E = \frac{F}{q_{пр}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}. \quad (1.6)$$

Если заряд Q окружает среда с диэлектрической проницаемостью ϵ , то напряженность создаваемого им поля

$$E = \frac{F}{q_{пр}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 \epsilon} \frac{Q}{r^2}. \quad (1.7)$$

Графически электрическое поле изображают *силовыми линиями*. Силовые линии начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных или уходят в бесконечность. На рис.1.3 изображены линии напряженности полей положительного (а), отрицательного (б) и системы из положительного и отрицательного зарядов (в).



Рис. 1.3

О величине напряженности поля судят по густоте линий. Чем гуще расположены линии, тем больше величина напряженности. Густота линий — это число линий, пронизывающих единичную площадку, перпендикулярную линиям. Вектор напряженности поля является касательным к силовым линиям в каждой точке поля.

Электрическое поле, напряженность которого в каждой точке одинакова по величине и направлению, называется *однородным*. Силовыми линиями однородного поля являются параллельные прямые, расположенные на одинаковом расстоянии друг от друга. Из рис. 1.3 видно, что электрическое поле точечного заряда является неоднородным.

Опыт показывает, что если на электрический заряд q одновременно действуют электрические поля нескольких зарядов, то результирующая сила оказывается равной геометрической сумме сил, действующих со стороны каждого поля в отдельности. Это означает, что электрические поля подчиняются *принципу суперпозиции*: если в данной точке пространства различные заряды создают электрические поля с напряженностями \vec{E}_1, \vec{E}_2 и т. д., то вектор напряженности электрического поля в этой точке равен сумме векторов напряженностей всех электрических полей (рис. 1.4):

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n . \quad (1.8)$$

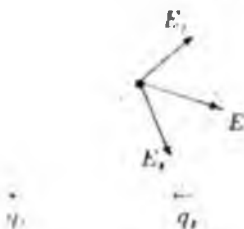


Рис. 1.4

1.3. Проводники и диэлектрики в электрическом поле

Как уже говорилось, по электрическим свойствам тела можно разделить на проводники и диэлектрики и полупроводники. Проводники содержат электрические заряды, которые могут свободно перемещаться внутри этих тел. При внесении металлического проводника в электростатическое поле его свободные электроны перемещаются под действием кулоновских сил в направлении, противоположном направлению вектора напряженности этого поля, и скапливаются на поверхности проводника. В результате на поверхностях проводника, перпендикулярных силовым линиям, появятся заряды противоположного знака. Их называют индуцированными.

Явление возникновения на поверхностях проводника, внесенного в электрическое поле, поверхностных зарядов противоположных знаков называется электростатической индукцией.

Электрическое поле поверхностных зарядов E' будет численно равно внешнему полю E_0 , но направлено противоположно ему. Поэтому результирующее поле внутри проводника E будет равно нулю:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \vec{E}' = 0. \quad (1.9)$$

Диэлектриками называют вещества, в которых отсутствуют свободные заряды. Заряды в диэлектриках могут смещаться из своих положений равновесия лишь на малые расстояния, порядка атомных. Диэлектрики по типу распределения зарядов разделяются на два типа: полярные и неполярные. У неполярных диэлектриков центр распределения положительного заряда в атоме совпадает с центром распределения отрицательного заряда (например, атом водорода). Если же центры распределения положи-

тельных и отрицательных зарядов не совпадают, то диэлектрики называются полярными (например, хлористый натрий). Молекулы таких диэлектриков представляют собой два точечных заряда, равных по величине, противоположных по знаку и расположенных на малом расстоянии друг от друга. Такую систему зарядов называют *электрическим диполем*. Молекулы полярных диэлектриков, помещенных во внешнее электрическое поле, получают преимущественную ориентацию, располагаясь таким образом, чтобы оси всех диполей оказались параллельными линиям напряженности внешнего поля. Тепловое движение расстраивает ориентацию диполей, поэтому диполи получают лишь частичную ориентацию, тем большую, чем больше напряженность внешнего поля (рис. 1.5, а, б).

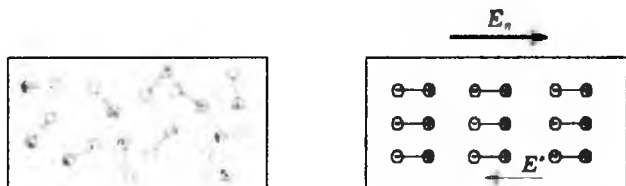


Рис. 1.5

В неполярных молекулах внешнее поле разделяет центры распределения положительных и отрицательных зарядов, образуя диполи, которые, как и в случае полярных молекул, принимают преимущественную ориентацию.

Смещение связанных электрических зарядов под действием внешнего электрического поля называется поляризацией диэлектрика.

При поляризации на поверхностях диэлектрика, не параллельных линиям напряженности внешнего поля, создающиеся заряды противостоят полю, создающему их.

электрическое поле \vec{E}' , которое направлено противоположно внешнему полю \vec{E}_0 . Поэтому поле внутри диэлектрика \vec{E}_1 меньше, чем в вакууме:

$$\vec{E}_1 = \vec{E}_0 - \vec{E}' \quad (1.10)$$

Величина, показывающая во сколько раз напряженность электрического поля в вакууме больше, чем в диэлектрике, называется диэлектрической проницаемостью этого диэлектрика:

$$\epsilon = \frac{E_0}{E_1 - E'} \quad (1.11)$$

1.4. Работа по перемещению заряда в электрическом поле. Потенциал

Рассмотрим однородное электрическое поле, в котором заряд $+q$ перемещается из точки 1 с координатой x_1 в точку 2 с координатой x_2 под действием кулоновской силы вдоль линии напряженности (рис. 1.6).

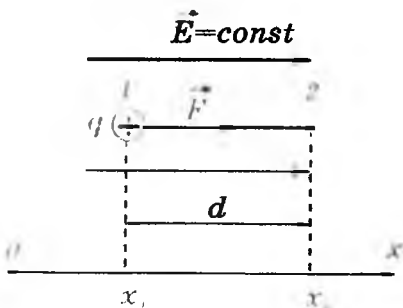


Рис. 1.6

Работа этой силы

$$A_{12} = F(x_2 - x_1) = qE(x_2 - x_1) = qEd \quad (1.12)$$

где $x_2 - x_1 = d$. При перемещении заряда между этими же точками по любой криволинейной траектории будет совершена такая же работа. Работа перемещения заряда в электростатическом поле не зависит от формы траектории движения заряда, а зависит от положения в этом поле начальной и конечной точек перемещения. Поля, обладающие таким свойством, называются потенциальными, т.е. электростатические поля являются потенциальными.

Перенесем теперь тот же заряд из точки 2 в точку 1. Так как теперь сила направлена против перемещения, то работа

$$A_{21} = -qEd. \quad (1.13)$$

Суммарная же работа перемещения заряда по замкнутой траектории будет равна нулю:

$$A_{121} = A_{12} + A_{21} = qEd - qEd = 0. \quad (1.14)$$

Согласно закону сохранения энергии работа перемещения заряда q в электростатическом поле равна изменению его потенциальной энергии, взятому со знаком минус. Связано это с тем, что при совершении полем положительной работы потенциальная энергия уменьшается, а при совершении отрицательной работы — увеличивается:

$$A = -\Delta W_n = -(W_{n2} - W_{n1}), \quad (1.15)$$

где W_{n1} и W_{n2} — потенциальные энергии заряда q в точках 1 и 2. С другой стороны, работа

$$A = Eq(x_2 - x_1) = Eqx_2 - Eqx_1, \quad (1.16)$$

где E — напряженность поля, а x_1 и x_2 — координаты точек поля 1 и 2. Из (1.15) и (1.16) следует:

$$W_{n1} = -qEx_1 \text{ и } W_{n2} = -qEx_2. \quad (1.17)$$

Таким образом, величина потенциальной энергии заряда в электростатическом поле

$$W_n = -qEx . \quad (1.18)$$

Разные заряды в точке с координатой x обладают разной потенциальной энергией. Однако, отношение значения потенциальной энергии к величине соответствующего заряда есть величина постоянная, равная величине потенциальной энергии единичного заряда, находящегося в данной точке поля. Эта величина называется *потенциалом поля* в данной точке:

$$\varphi = \frac{W_n}{q} . \quad (1.19)$$

Потенциал – энергетическая характеристика поля, он является скалярной величиной. Из (1.18) и (1.19) находим

$$\varphi = \frac{qEx}{q} = Ex \quad (1.20)$$

Потенциал не зависит от величины заряда q , внесенного в данную точку поля, а определяется свойствами самого поля. Из формулы (1.20) видно, что в однородном поле, в котором напряженность во всех точках одна и та же, потенциал в каждой точке различный, так как разные точки поля имеют разные координаты. При $x = 0$ и $\varphi = 0$. Следовательно, за точку с нулевым потенциалом можно принять любую точку поля и относительно нее отсчитывать потенциалы других точек.

Рассмотренное однородное электрическое поле может быть создано только в каком-то ограниченном объеме. В реальных случаях абсолютная величина напряженности электрического поля, создаваемого одиночным зарядом или группой зарядов,

убывает по мере удаления от этих зарядов и на бесконечности стремится к нулю. Поэтому при решении задач о потенциалах в неоднородном поле обычно за нулевой принимают потенциал точки, бесконечно удаленной от зарядов, или же потенциал Земли. Потенциал может быть и положительным, и отрицательным. Если поле создано положительным зарядом, то потенциал поля считают положительным.

Перенесем заряд q из точки поля с потенциалом φ_1 в точку поля с потенциалом φ_2 . Из формул (1.15) и (1.19) следует:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}. \quad (1.21)$$

Величина $\varphi_1 - \varphi_2 = U$ называется разностью потенциалов или *напряжением*. Если $\varphi_2 = 0$ (вторая точка удалена в бесконечность), то

$$\varphi_1 = \frac{A}{q}. \quad (1.22)$$

Отсюда следует определение для потенциала поля, убывающего в бесконечности. *Потенциал – величина, численно равная работе поля по перемещению единичного заряда из данной точки в бесконечность.* Физический смысл имеет не сам потенциал, а разность потенциалов. Связано это с тем, что потенциал любой точки поля может быть принят за нулевой.

Напряжение и потенциал в системе СИ измеряются в *вольтах* (В). Если при перемещении заряда величиной в 1 Кл между двумя точками цепи совершается работа в 1 Дж, то напряжение между этими двумя точками равно 1 В. Для измерений малых напряжений используют милливольты (мВ): $1 \text{ мВ} = 10^{-3} \text{ В}$ и микровольты: $1 \text{ мкВ} = 10^{-6} \text{ В}$, а для больших напряжений – киловольты (кВ), $1 \text{ кВ} = 10^3 \text{ В}$.

Приведем напряжения, которые встречаются на практике. Напряжение, которое дает гальванический элемент (батарея), равно 1,5 В; автомобильный аккумулятор дает напряжение около 12 В, напряжение городской осветительной сети – 220 В, напряжение между контактными проводами и рельсом трамвая – 600 В; напряжение в городских кабельных электрических распределительных сетях – 6 или 11 кВ; напряжения между проводами длинных линий электропередачи – от 110 до 1000 кВ.

1.5. Емкость. Конденсаторы.

Соединение конденсаторов

В электростатическом поле все точки проводника имеют один и тот же потенциал, который, как показывает опыт, пропорционален заряду проводника, т.е. отношение заряда q к потенциалу φ не зависит от заряда q . Поэтому оказалось возможным ввести понятие электрической емкости (емкости) C уединенного проводника:

$$C = \frac{q}{\varphi}. \quad (1.23)$$

Емкость – скалярная величина, численно равная заряду, который нужно сообщить проводнику, чтобы его потенциал изменился на единицу. Емкость определяется геометрическими размерами проводника, его формой и свойствами окружающей среды (ее диэлектрической проницаемостью ϵ) и не зависит от материала проводника. За единицу емкости в системе СИ принимают емкость такого проводника, потенциал которого изменяется на 1 В при сообщении ему заряда в 1 Кл. Эта единица емкости называется *фарад* (Ф). 1 Ф = 1 Кл/В. 1 Ф – это

очень большая емкость. На практике используют микрофарады ($1 \text{ мкФ} = 10^6 \text{ Ф}$), нанофарады ($1 \text{ нФ} = 10^9 \text{ Ф}$) и пикофарады ($1 \text{ пФ} = 10^{12} \text{ Ф}$).

Наличие вблизи проводника других тел изменяет его емкость, так как потенциал проводника зависит и от электрических полей, создаваемых зарядами, наведенными в окружающих телах вследствие электростатической индукции. Можно создать систему проводников, которая будет обладать емкостью значительно большей, чем уединенный проводник, и притом не зависящей от окружающих тел. Такую систему называют *конденсатором*. Простейший конденсатор состоит из двух проводников (обкладок), расположенных на малом расстоянии друг от друга. Электрическое поле заряженного конденсатора сосредоточено практически полностью между обкладками (внутри) конденсатора. Линии вектора напряженности поля E начинаются на одной обкладке и заканчиваются на другой. Заряды на обкладках одинаковы по величине и противоположны по знаку.

Основной характеристикой конденсатора является его емкость, под которой понимают величину, пропорциональную заряду одной из обкладок и обратно пропорциональную разности потенциалов между обкладками:

$$C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \frac{q}{U}. \quad (1.24)$$

Емкость конденсатора зависит от его размеров, формы и диэлектрической проницаемости ε диэлектрика, находящегося между обкладками. В случае плоского конденсатора его емкость

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}, \quad (1.25)$$

где S – площадь обкладки, d – расстояние между обкладками (пластинами). Линейные размеры пластин обычно велики по сравнению с расстоянием между пластинами. В этом случае можно пренебречь «краевыми» эффектами и считать электрическое поле сосредоточенным внутри конденсатора и практически однородным, а заряд q распределенным по пластинам равномерно с поверхностной плот-

ностью $\sigma = \frac{q}{S}$.

При необходимости увеличить емкость конденсаторы соединяют между собой параллельно (рис. 1.7).

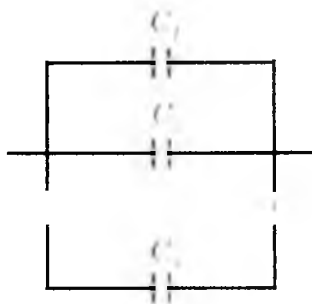


Рис. 1.7

При этом способе соединения общая площадь пластин увеличивается по сравнению с площадью пластины отдельного конденсатора. Общая емкость конденсаторов, соединенных параллельно, равна сумме емкостей отдельных конденсаторов:

$$C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad (1.26)$$

Эта формула получается следующим образом. При параллельном соединении все конденсаторы находятся под одинаковым напряжением U , а общий заряд всех конденсаторов равен Q . При этом каж-

дый конденсатор соответственно получит заряд Q_1, Q_2, Q_3 и т.д. Следовательно, общий заряд

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots \quad (1.27)$$

Из определения емкости следует, что $Q_1 = C_1 U, Q_2 = C_2 U, Q_3 = C_3 U$. Подставляя эти выражения в формулу (1.27) и разделив обе части равенства на U , получим формулу (1.26).

При необходимости уменьшить емкость конденсаторы соединяют последовательно (рис. 1.8).

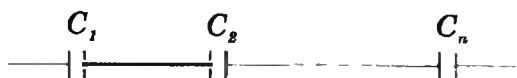


Рис. 1.8

При этом общая емкость конденсаторов вычисляется по формуле

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \quad (1.28)$$

Эта формула получается следующим образом. Общее напряжение на всех конденсаторах равно U , а напряжение на каждом конденсаторе соответственно будет равно U_1, U_2, U_3 и т.д. Следовательно, общее напряжение

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots \quad (1.29)$$

Из определения емкости (1.23) следует, что

$$U_1 = \frac{Q}{C_1}, U_2 = \frac{Q}{C_2}, U_3 = \frac{Q}{C_3}. \text{ Подставляя эти выраже-}$$

ния в формулу (1.29) и разделив обе части равенства на Q , получим формулу (1.28).

Вопросы для повторения

1. Из каких частиц состоит атом?
2. Какая атомная частица имеет положительный заряд и большую массу?

3. *Какая атомная частица имеет отрицательный заряд и маленькую массу?*
4. *Какая атомная частица не имеет заряда?*
5. *Что определяет атомную массу элемента?*
6. *Что определяет атомный номер элемента?*
7. *Что такое валентность?*
8. *Почему одни материалы являются проводниками, а другие изоляторами?*
9. *Приведите примеры проводников и диэлектриков.*
10. *Сформулируйте закон Кулона.*
11. *Сформулируйте закон сохранения заряда.*
12. *Что такое напряженность электрического поля?*
13. *Как графически изображают электрическое поле?*
14. *Сформулируйте принцип суперпозиции.*
15. *Что такое электростатическая индукция?*
16. *Чему равна напряженность электрического поля внутри проводника?*
17. *Что такое диэлектрическая проницаемость?*
18. *Что такое разность потенциалов? В каких единицах она измеряется?*
19. *Чему равна емкость уединенного проводника? В каких единицах измеряется емкость?*
20. *Как устроен конденсатор?*
21. *По какой формуле вычисляется емкость плоского конденсатора?*
22. *Как надо соединить конденсаторы, чтобы их общая емкость увеличилась? Уменьшилась?*
23. *Как вычислить общую емкость конденсаторов при параллельном соединении?*
24. *Как вычислить общую емкость конденсаторов при последовательном соединении?*

Глава 2. Постоянный электрический ток

2.1. Закон Ома для участка цепи.

Сопротивление

Как уже говорилось, носителями тока в металлах являются свободные электроны. Наряду со свободными электронами в металлах имеются положительные заряды – ионы, расположенные в узлах кристаллической решетки и не принимающие участия в переносе тока. При отсутствии внешнего электрического поля свободные электроны движутся хаотически (беспорядочно) и ток в металле равен нулю. При наличии электрического поля они приобретают дополнительное упорядоченное движение (дрейф) против поля, создавая электрический ток.

Электрическим током называется упорядоченное движение электрических зарядов, а сами заряды – носителями тока. Например, в металлах и полупроводниках носителями тока являются электроны, в жидких проводниках (электролитах) положительные и отрицательные ионы, а в ионизированных газах – как ионы, так и электроны. Ток, возникающий внутри твердого, жидкого или газообразного проводника, называется *током проводимости*. За направление электрического тока условно принято направление упорядоченного движения положительных зарядов.

Для возникновения тока необходимо наличие электрической цепи. Электрическая цепь – это состоящий из проводников замкнутый путь для тока, т. е. для направленного движения электрических зарядов. Для поддержания тока в цепи нужен источник электрической энергии. Он преобразует какую-либо форму энергии (например, химическую или механическую) в электрическую. Полученная от источника электрическая энергия преобразуется в другие формы энергии в различных ее приемниках.

Источником электрической энергии может быть батарея гальванических элементов (химических источников тока) или генератор, преобразующий механическую энергию в электрическую. В роли приемников электрической энергии могут выступать резисторы (реостаты), электрические лампочки, электролитические ванны, электродвигатели и многие другие устройства, которые преобразуют электрическую энергию в другие виды энергии.

Количественной характеристикой электрического тока является сила тока. Силой тока называют скалярную величину I , численно равную заряду Δq , проходящему через поперечное сечение проводника за единицу времени:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Если сила и направление тока не изменяются со временем, то сила тока равна:

$$I = \frac{q}{t} \quad (2.2)$$

где q – заряд, который переносится через поперечное сечение проводника за время t .

В системе СИ единицей силы тока является ампер (А). При токе в 1 А через полное сечение проводника за 1 с проходит заряд 1 Кл. Также использу-

ют и более мелкие единицы: 1 миллиампер (мА) = $=10^{-3}$ А и 1 микроампер = 10^{-6} А.

Какие же силы тока встречаются на практике? Человек начинает ощущать проходящий через его тело ток, когда сила тока достигает 0,005 А. Ток величиной около 0,05 А уже опасен для жизни. Сила тока в лампочках накаливания от 0,2 до 1 А, в утюгах и электрокаминах – от 5 до 8 А, а в электродвигателях трамваев и троллейбусов – свыше 100 А.

Сила постоянного тока в металлическом проводнике может быть также выражена следующей формулой:

$$I = \frac{q}{t} = \frac{Ne}{t} = \frac{nVe}{t} = \frac{nSle}{t} = nv_{cp}Se, \quad (2.3)$$

где Ne – заряд, проходящий через сечение проводника S , $n = N/V$ – концентрация электронов, N – число электронов в объеме V проводника, l – длина проводника, e – заряд электрона, $v_{cp} = l/t$ – средняя скорость упорядоченного движения электронов.

Для количественной характеристики электрического тока используют также плотность тока, которая равна величине заряда, проходящего в единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярной направлению движения зарядов:

$$j = \frac{I}{S} \quad (2.4)$$

Плотность тока – это вектор, направление которого совпадает с направлением скорости движения заряженных частиц. Для металлических проводников

$$\vec{j} = env_{cp}. \quad (2.5)$$

Плотность тока измеряется в амперах на квадратный метр (А/м²).

Если плотность тока и сила тока не меняются во времени, то мы говорим, что в проводнике течет

постоянный, или *стационарный*, ток. Для постоянного тока сила тока одинакова во всех сечениях проводника. Если сила тока не остается постоянной, то мы говорим об изменяющемся токе. Частным случаем изменяющегося тока является переменный синусоидальный ток, который называют просто *переменным* током.

Когда мы включаем электрическую лампочку, то она загорается сразу, независимо от длины проводов, соединяющих ее с выключателем. Это вовсе не означает, что электроны начали двигаться с огромной скоростью и очень быстро достигли лампочки. Скорость поступательного движения свободных электронов в металлах довольно мала — она называется скоростью дрейфа и составляет доли миллиметра в секунду. Так почему же лампочка загорается сразу? Дело в том, что скорость распространения электрического взаимодействия очень велика — она практически равна скорости света в вакууме, т. е. 300 000 км/с. При замыкании электрической цепи все содержащиеся в проводнике свободные электроны почти одновременно приходят в движение, и ток начинает идти через лампочку. При этом через лампочку сначала проходят ближайšie к ней электроны. Здесь уместна аналогия с водопроводом: когда вы открываете кран, из него начинает течь вода из ближайших труб, а частицы воды из водонапорной станции дойдут до вас совсем не скоро.

Электроны в проводниках движутся не свободно, а испытывают соударения с ионами кристаллической решетки, что тормозит их поступательное движение. Это противодействие проводника направленному движению зарядов, т.е. электрическому току, называется *сопротивлением* проводника. Оно обозначается буквой r или R .

Взаимодействуя с ионами, электроны передают решетке избыточную кинетическую энергию, которую они приобретают во время свободного пробега. За счет этого амплитуда колебаний ионов решетки увеличивается, и температура металла возрастает.

В 1826 г. Георг Ом (1787–1854) экспериментально установил, что *сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению, приложенному к концам этого участка, и обратно пропорциональна его сопротивлению:*

$$I = \frac{U}{R} \quad (2.6)$$

Сопротивление проводника зависит от материала, из которого изготовлен проводник, его размеров и геометрической формы, а также от температуры. Для однородного проводника постоянного сечения

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (2.7)$$

где ρ – *удельное сопротивление*, т.е. сопротивление проводника единичной длины с единичной площадью поперечного сечения, l – *длина проводника*, S – *площадь поперечного сечения*. Сопротивление измеряется в *омах* (Ом). 1 Ом – это сопротивление проводника, по которому течет ток с силой 1 А при напряжении между его концами 1 В. На практике сопротивление также измеряют в килоомах (1 кОм = 10^3 Ом) и в мегаомах (1 МОм = 10^6 Ом).

Удельное сопротивление служит для характеристики различных проводящих материалов. Это сопротивление между гранями куба с ребром в 1 м, изготовленного из данного материала. Единица удельного сопротивления – Ом.м.

Значения удельных сопротивлений для некоторых проводящих материалов приведены в таблице 2.1.

Мы видим, что наименьшим удельным сопротивлением обладают серебро, медь и алюминий. Поэтому для изготовления электрических проводов используют медь и алюминий (серебро из-за его высокой стоимости используется только для тонкослойного покрытия проводов в высокочастотной электронике). Для изготовления нагревательных приборов используются сплавы с высоким удельным сопротивлением, например нихром.

Устройство, обладающее сопротивлением и используемое для ограничения тока в электрической цепи или в приемнике электроэнергии, называется резистором. Резисторы бывают с постоянным и с переменным (регулируемым) сопротивлением.

Величина g , обратная сопротивлению, называется проводимостью:

$$g = \frac{1}{R} \quad (2.8)$$

Единицей проводимости в системе СИ является *сименс* ($1 \text{ См} = 1 \text{ Ом}^{-1}$).

Величина λ , обратная удельному сопротивлению, называется удельной проводимостью:

$$\lambda = \frac{1}{\rho} \quad (2.9)$$

Основным препятствием дрейфу электронов в проводнике являются колеблющиеся ионы. Поскольку амплитуда колебаний ионов зависит от температуры, то и сопротивление проводников также должно зависеть от температуры. Эта зависимость достаточно точно описывается формулой

$$R = R_0(1 + \alpha t) \quad (2.10)$$

или для удельного сопротивления:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t), \quad (2.11)$$

Удельное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления некоторых проводящих материалов

Таблица 2.1

Материал	Удельное сопротивление, ρ (Ом·м) · 10 ⁻⁸	Температурный коэффициент сопротивления, α (1/град)
Серебро	1,6	0,0035
Медь	1,7–1,8	0,0041
Алюминий	2,95	0,0040
Сталь	12,5–14,6	0,0057
Железо	9–11	0,0060
Свинец	22,1	0,0039
Вольфрам	5,3	0,0048
Уголь	400–600	– 0,005
Константан	44–50	0,00005
Нихром	100–110	0,0001
10%-ный раствор NaCl	8 000 000	– 0,02

где R_0 и ρ_0 – сопротивление и удельное сопротивление при 0 °С, α – температурный коэффициент сопротивления, т.е. изменение сопротивления величиной в 1 Ом при изменении температуры на 1 °С. В табл. 2.1 приведены значения температурного коэффициента сопротивления для некоторых проводящих материалов.

У металлов температурный коэффициент сопротивления положителен, а у электролитов и графита

отрицателен. Для изготовления точных резисторов, используемых в измерительных приборах, разработаны сплавы с очень низким температурным коэффициентом сопротивления. Таким сплавом является, например, константан. Его сопротивление практически не меняется при изменении температуры.

2.2. Соединение сопротивлений

2.2.1. Последовательное соединение

При последовательном соединении конец предыдущего проводника соединяют с началом последующего проводника (рис.2.1):

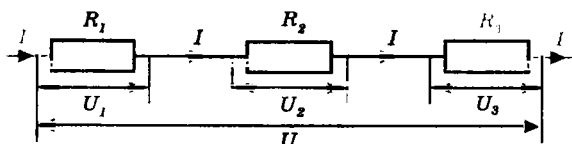


Рис. 2.1

При последовательном соединении сила тока во всех проводниках одинакова:

$$I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I. \quad (2.12)$$

Напряжение U на концах всей цепи равно сумме напряжений на проводниках. Например, для случая трех проводников, указанных на рисунке,

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \quad (2.13)$$

По закону Ома для участка цепи

$$U_1 = IR_1; U_2 = IR_2; U_3 = IR_3; U = IR, \quad (2.14)$$

где R_1, R_2, R_3 — сопротивления проводников, R — общее сопротивление всего участка цепи. Из (2.13) и (2.14) следует: $IR = I(R_1 + R_2 + R_3)$, откуда

$$R = R_1 + R_2 + R_3. \quad (2.15)$$

Для n последовательно включенных проводников

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n. \quad (2.16)$$

Если все они имеют одинаковое сопротивление R_1 , то

$$R = nR_1. \quad (2.17)$$

При последовательном соединении проводников общее сопротивление равно сумме сопротивлений всех проводников.

Из соотношений (2.14) следует, что

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (2.18)$$

Напряжения на последовательно соединенных проводниках прямо пропорциональны их сопротивлениям.

2.2.2. Параллельное соединение

При параллельном соединении начала всех проводников соединяют в одной точке, а их концы – в другой (рис. 2.2).

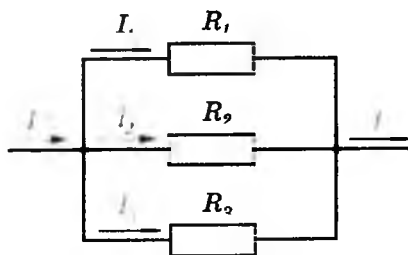


Рис. 2.2

В этом случае сила тока I в неразветвленной цепи равна сумме сил токов в параллельно соединенных проводниках:

$$I = I_1 + I_2 + I_3. \quad (2.19)$$

Напряжение на концах всех проводников одинаково:

$$U_1 = U_2 = U_3 = U. \quad (2.20)$$

По закону Ома (для случая трех проводников)

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; I_2 = \frac{U}{R_2}; I_3 = \frac{U}{R_3}; I = \frac{U}{R}, \quad (2.21)$$

где R_1, R_2, R_3 — сопротивления проводников, R — общее сопротивление участка. Из (2.20) и (2.21) следует

$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}, \quad (2.22)$$

откуда

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (2.23)$$

При параллельном соединении величина, обратная общему сопротивлению цепи, равна сумме величин, обратных сопротивлениям всех проводников.

Если имеется n параллельно соединенных проводников, имеющих одинаковое сопротивление R , то общее сопротивление цепи

$$R = \frac{R_1}{n}. \quad (2.24)$$

Из соотношений (2.21) следует, что

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (2.25)$$

Силы токов в параллельно соединенных проводниках обратно пропорциональны их сопротивлениям.

В табл. 2.2 приведены условные графические обозначения элементов электрических цепей.

Условные графические обозначения элементов электрических цепей

Таблица 2.2

Наименование	Обозначение
Постоянный резистор	
Переменный резистор (реостат)	
Катушка индуктивности	
Конденсатор	
Переменный конденсатор	
Трансформатор	
Источник тока	
Выключатель	

2.3. Работа и мощность электрического тока.

Закон Джоуля–Ленца

Как уже говорилось, работа при перемещении заряда q между некоторыми точками цепи равна про-

изведению этого заряда на напряжение между этими точками (1.21). Если к концам проводника приложено напряжение U , то за время t из одного конца проводника в другой переносится заряд:

$$q = It. \quad (2.26)$$

Следовательно, работа, произведенная электрическим током за время t :

$$A = UIt. \quad (2.27)$$

В системе СИ работа измеряется в *джоулях* ($1 \text{ Дж} = 1 \text{ В А с}$).

Скорость совершения работы характеризуется мощностью. Мощностью P называется отношение работы A к промежутку времени t , за который она совершена. Таким образом, в электрической цепи

$$P = \frac{A}{t} = UI. \quad (2.28)$$

В системе СИ мощность измеряется в *ваттах* ($1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$). 1 Ватт — это мощность, при которой за 1 с совершается работа в 1 Дж.

С помощью закона Ома (2.6) выражения для работы и мощности можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} A &= UIt = \frac{U^2}{R} t = I^2 Rt; \\ P &= UI = \frac{U^2}{R} = I^2 R. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Итак, для поддержания в цепи постоянного тока необходимо совершать работу. Энергия электрического тока в проводнике непрерывно расходуется и переходит в другие формы энергии. В случае, когда проводник неподвижен и химических превращений в нем не происходит, работа тока затрачивается на увеличение внутренней энергии проводника, в результате чего проводник нагревается. При этом количество выделившейся теплоты

$$Q = IUt = I^2 Rt. \quad (2.30)$$

Соотношение (2.30) было установлено Д. Джоулем (1818–1889), подтверждено опытами Э. Х. Ленца (1804–1865) и носит название закона Джоуля–Ленца.

Количество теплоты, выделяющееся в проводнике при прохождении по нему постоянного тока, прямо пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени его прохождения.

2.4. Расчет проводов на потерю напряжения

Одним из практически важных расчетов электрических цепей является расчет проводов на потерю напряжения.

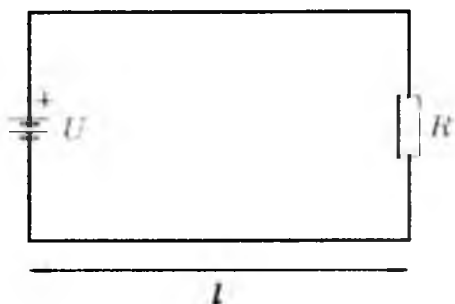


Рис. 2.3

При таком расчете обычно задаются: напряжением источника U , расстояние от этого источника до приемника электроэнергии l , сила тока I или мощность нагрузки P и номинальное напряжение U_n , которое необходимо для нормальной работы приемников электроэнергии (например, электродвигателей, ламп накаливания и т.п.) (рис. 2.3).

Задача состоит в расчете такого сечения проводов, при котором обеспечивается номинальное напряжение на зажимах приемников электроэнергии.

Согласно закону Ома, напряжение источника электроэнергии равно сумме падения напряжения на проводах и напряжения на нагрузке:

$$U = U_n + \Delta U \quad (2.31)$$

Сопротивление проводов линии

$$r = \frac{\rho \cdot 2l}{S} \quad (2.32)$$

где $2l$ – общая длина линии; r – удельное сопротивление материала проводов; S – искомое сечение проводов.

Подставляя (2.32) в (2.31), получим

$$S = \frac{I \rho 2l}{\Delta U} \quad (2.33)$$

где $\Delta U = U - U_n$ – потеря напряжения в линии.

Нагрузка в линии обычно бывает непостоянной, и ее колебания вызывают соответствующие изменения ΔU в проводах. Поэтому нужно рассчитывать отклонения напряжения на нагрузке от номинального значения при максимальном и минимальном режимах нагрузки.

Рассмотрим, как влияет напряжение на распределение мощности в линии электропередачи (рис. 2.3). Напряжение источника электроэнергии равно сумме падения напряжения на проводах и напряжения на нагрузке (2.31). Умножив это уравнение на силу тока I , получим уравнение распределения мощности в цепи:

$$UI = I^2 r_n + U_n I, \quad (2.34)$$

где UI – мощность, отдаваемая источником электроэнергии; $I^2 r_n$ – потери мощности в проводах ли-

нии на нагревание; $U_{\text{н}} I$ – мощность, потребляемая нагрузкой.

Если повысить в 2 раза напряжение источника электроэнергии, то сила тока в линии при той же передаваемой мощности уменьшится в 2 раза, а потери мощности в проводах линии уменьшатся в 4 раза, поскольку они пропорциональны I^2 . Следовательно, для уменьшения потерь в линиях передачи желательно передавать электроэнергию при возможно более высоком напряжении.

2.5. Источники электрического тока.

Электродвижущая сила. Закон Ома для замкнутой цепи

Для поддержания в проводнике постоянного тока в течение определенного времени необходимо, чтобы напряженность электрического поля внутри проводника была отлична от нуля и не изменялась со временем. Если создать в проводнике электрическое поле, то перемещение зарядов приведет к исчезновению этого поля, т.е. к исчезновению разности потенциалов на концах проводника и, следовательно, к исчезновению тока.

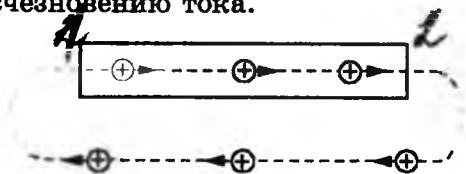


Рис. 2.4

Для поддержания тока необходимо отводить заряды от конца проводника с меньшим потенциалом φ_2 и подводить их снова к концу проводника с большим потенциалом φ_1 , т.е. необходимо осуществить круговое движение зарядов (рис. 2.4).

Движение положительных зарядов в сторону убывания потенциала осуществляется электростатическими (кулоновскими) силами. Движение положительных зарядов в сторону возрастания потенциала не может осуществляться электростатическими силами (так как это движение происходит против электростатических сил). Это возможно лишь с помощью сил неэлектростатического происхождения. Их называют *сторонними силами*. Они могут быть обусловлены химическими процессами, диффузией носителей тока в неоднородной среде или через границу двух разнородных веществ, электрическими (но не электростатическими) полями, порождаемыми меняющимися во времени магнитными полями и т.д. Устройства, в которых возникают сторонние силы, называют *источниками тока*.

Работа сторонних сил, отнесенная к единице положительного заряда, называется электродвижущей силой (ЭДС) \mathcal{E} :

$$\mathcal{E} = \frac{A}{q} \quad (2.35)$$

Следует отметить, что ни сторонние силы, ни электродвижущая сила не являются силами в механическом смысле — эти названия сложились исторически. Измеряется ЭДС в вольтах.

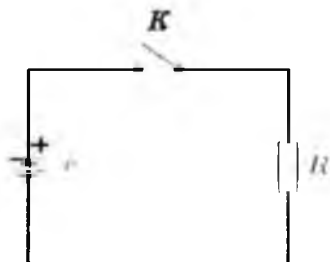


Рис. 2.5

Рассмотрим замкнутую электрическую цепь, состоящую из источника тока с ЭДС e и внутренним сопротивлением r и сопротивления нагрузки R (рис. 2.5).

Из закона сохранения энергии следует, что запас работы сторонних сил в источнике тока расходуется на полную работу тока в цепи, т.е. превращается в тепло как на внешнем сопротивлении нагрузки, так и на внутреннем сопротивлении источника тока. Приравнявая эти величины, получим

$$eq = I^2 R t + I^2 r t. \quad (2.36)$$

Разделив обе части этого уравнения на величину заряда $q = It$, получим

$$I = \frac{e}{R + r}. \quad (2.37)$$

Это закон Ома для замкнутой цепи: сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна ЭДС источника тока и обратно пропорциональна сумме сопротивлений внешнего и внутреннего участков цепи. Сумму внешнего и внутреннего сопротивлений ($R + r$) называют полным сопротивлением цепи.

2.6. Разветвленные цепи. Правила Кирхгофа

Два правила Кирхгофа полностью определяют электрическое состояние цепей и дают основу для их расчета. Оба эти правила установлены на основе многочисленных опытов и являются следствием закона сохранения энергии.

Согласно первому правилу Кирхгофа *алгебраическая сумма токов в любом узле электрической цепи равна нулю*:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0. \quad (2.38)$$

т.е. в любом узле цепи сумма приходящих токов равна сумме уходящих токов.

Например, для узла, изображенного на рис. 2.6:

$$I_1 + I_2 + I_5 = I_3 + I_4 \quad \text{или}$$

$$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 + I_5 = 0. \quad (2.39)$$

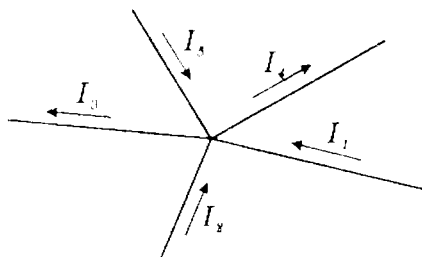


Рис. 2.6

Алгебраическая сумма токов – это заряд, приходящий в данный узел за единицу времени. Если в данной цепи токи постоянны, то эта сумма токов должна равняться нулю, так как в противном случае в узле стал бы накапливаться заряд и его потенциал стал бы изменяться со временем, а значит, изменялись бы и токи в цепи.

Рассмотрим теперь разветвленную цепь, изображенную на рис. 2.7.

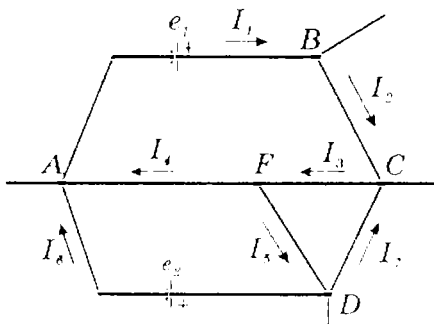


Рис. 2.7

Выделим в этой разветвленной цепи какой-либо замкнутый контур, например, контур ABCFA. Согласно второму правилу Кирхгофа в любом замкнутом электрическом контуре сумма всех падений напряжения равна сумме всех ЭДС в нем:

$$\sum_{k=1}^n I_k R_k = \sum_{k=1}^n \mathcal{E}_k \quad (2.40)$$

Оба правила Кирхгофа весьма полезны при расчете разветвленных цепей. Применяя их к точкам разветвления и к различным замкнутым контурам, входящим в сложную цепь, мы получаем уравнения для определения всех неизвестных токов. Можно показать, что число независимых уравнений при этом всегда равно числу неизвестных токов, и поэтому правила Кирхгофа дают общий метод расчета разветвленных цепей.

При составлении уравнений с помощью правил Кирхгофа следует тщательно соблюдать правило знаков: если при выбранном направлении обхода ЭДС проходится от минуса к плюсу, то она записывается со знаком плюс; если направление тока не совпадает с направлением обхода контура, то падение напряжения записывается со знаком минус.

В связи с этим правилом знаков возможны затруднения при составлении уравнений. Ведь направления токов заранее не известны и должны быть найдены из решения задачи, тогда как само составление уравнений требует их знания. Однако в действительности все очень просто. Дело в том, что направления токов на каждом участке можно выбирать произвольно. Так же произвольно выбираются направления обхода контуров. Действительное направление токов будет определено после решения задачи: если какой-либо ток окажется положительным, это значит, что его направление совпадает с

тем, которое мы предположили; если же ток окажется отрицательным, это значит, что он направлен противоположно.

Метод Кирхгофа приводит к необходимости решения системы алгебраических уравнений первого порядка. В случае сложных цепей количество уравнений в ней может быть довольно большим, что затрудняет ее решение. Поэтому существуют вспомогательные приемы, которые позволяют уменьшить число уравнений системы. Рассмотрим примеры применения правил Кирхгофа для расчета различных электрических цепей.

2.7. Методы расчета электрических цепей

Пример 1. Параллельное соединение сопротивлений. Шунтирование.

Пусть в цепь источника тока с ЭДС e и внутренним сопротивлением r параллельно включены два сопротивления R_1 и R_2 (рис. 2.8).

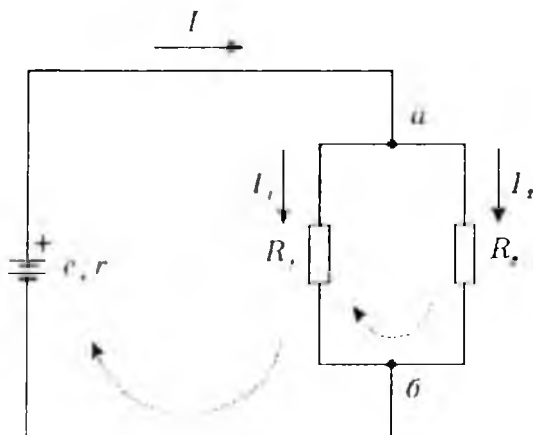


Рис. 2.8

Вычислим токи в цепи. Выберем направления токов и направления обхода контуров такими, какими они показаны на рисунке. Для точки a первое правило Кирхгофа дает:

$$I - I_1 - I_2 = 0. \quad (2.41)$$

Применив второе правило Кирхгофа к контурам aR_2bR_1a и aR_1bea , получим следующие уравнения:

$$-I_1R_1 + I_2R_2 = 0, \quad (2.42 \text{ а})$$

$$Ir + I_1R_1 = e. \quad (2.42 \text{ б})$$

Итак, мы получили три уравнения для определения трех неизвестных токов. Исключая из уравнений (2.41) и (2.42а) ток I_1 , имеем:

$$\frac{I_2}{I} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}, \quad (2.43)$$

а исключая из тех же уравнений ток I_2 , получим:

$$\frac{I_1}{I} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}. \quad (2.44)$$

Поделив (2.44) на (2.43), имеем:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}, \quad (2.45)$$

т.е. отношение сил токов в двух проводниках, соединенных параллельно, обратно пропорционально отношению их сопротивлений. Подставляя выражение (2.44) для I_1 в уравнение (2.42б), мы получим:

$$I\left(r + \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2}\right) = e. \quad (2.46)$$

Сравнивая выражение (2.46) с законом Ома для замкнутой цепи (2.37), мы видим, что общее сопротивление двух параллельно соединенных проводников

$$R_{\text{экв}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.47)$$

Этот результат можно записать в более удобном виде:

$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (2.48)$$

Полученное уравнение легко обобщить на произвольное количество параллельно соединенных проводников:

$$\frac{1}{R_{\text{экв}}} = \sum \frac{1}{R_i} \quad (2.49)$$

Параллельное соединение сопротивлений используют для расширения пределов измерения амперметров, так называемого шунтирования. *Шунтирование* – это создание обходного пути для тока. Пусть требуется определить силу тока в цепи с помощью амперметра с недостаточно большим пределом измерения. В этом случае параллельно амперметру включают сопротивление, которое называется *шунтом* (рис. 2.9).

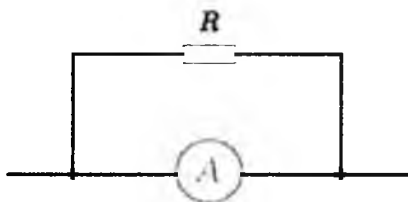


Рис. 2.9

Тогда согласно формуле (2.43) отношение силы тока через амперметр I_A к измеряемой силе тока в цепи I

$$\frac{I_A}{I} = \frac{R}{R + R_A} \quad (2.50)$$

где R_A – сопротивление амперметра, а R – сопротивление шунта.

Следовательно, если мы хотим измерять ток, величина которого в n раз больше тока, на который рассчитан амперметр – $I = nI_A$, то мы должны параллельно амперметру подключить шунт с сопротивлением

$$\frac{I_A}{nI_A} = \frac{R}{R + R_A} \Rightarrow R = \frac{R_A}{n - 1} \quad (2.51)$$

Пример 2. Разветвленная цепь.

Рассмотрим теперь более сложную цепь, изображенную на рис. 2.10. Требуется найти токи во всех участках цепи при заданных параметрах составляющих ее элементов.

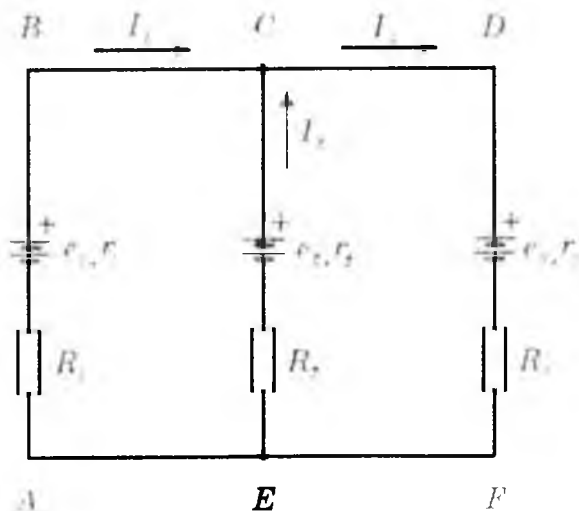


Рис. 2.10

Для составления уравнений Кирхгофа сначала необходимо разметить предполагаемые направления токов и составить уравнения для узлов цепи согласно первому правилу. Далее надо выбрать контуры обхода таким образом, чтобы в каждый из них входило не менее одной ветви, не вошедшей в предыдущие контуры. При этом условии полученные уравнения будут независимы. Потом надо установить направления обхода контуров и записать для этих контуров уравнения согласно второму правилу Кирхгофа, учитывая правило знаков.

Выберем направления токов так, как это показано на рис. 2.10. Если мы ошиблись в выборе направления какого-либо тока, то при решении уравнений он получится отрицательным; если же случайно выбрано правильное направление тока, то он получится положительным.

В данной схеме два узла: точки С и Е. Применим первое правило Кирхгофа к узлу С:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0. \quad (2.52)$$

Для узла Е первое правило Кирхгофа дает точно такое же уравнение.

В данной схеме три замкнутых контура: АВСЕА, ЕСДФЕ и АВСДФЕА. Рассмотрим контур АВСЕА и будем обходить его по часовой стрелке, учитывая правило знаков: если направления ЭДС (от минуса к плюсу) и тока совпадают с направлением обхода, то они берутся со знаком плюс. В противном случае ЭДС и ток берут со знаком минус. ЭДС e_1 проходит от минуса к плюсу и поэтому берется со знаком плюс. ЭДС e_2 проходит от плюса к минусу и поэтому берется со знаком минус. Ток I_1 проходит через резисторы r_1 и R_1 , и его направление совпадает с направлением обхода контура. Ток I_2 проходит через резисторы r_2 и R_2 и направлен против

направления обхода. Следовательно, ток I_1 берется со знаком плюс, а ток I_2 — со знаком минус. Итак, второе правило Кирхгофа для контура АВСЕА дает следующее уравнение:

$$I_1(r_1 + R_1) - I_2(r_2 + R_2) = e_1 - e_2. \quad (2.53)$$

Теперь рассмотрим контур ЕСDFE. Для него второе правило Кирхгофа при обходе по часовой стрелке дает следующее уравнение:

$$I_2(r_2 + R_2) + I_3(r_3 + R_3) = e_2 - e_3. \quad (2.54)$$

Уравнения (2.52) — (2.54) образуют систему из трех независимых уравнений, и ее решение даст нам токи I_1 , I_2 и I_3 . Контур ABCDFEA можно не рассматривать, поскольку его обход даст нам уравнение, вытекающее из двух предыдущих.

Для проверки правильности расчетов можно использовать энергетическое условие: алгебраическая сумма мощностей, отдаваемая источниками ЭДС, должна быть равна сумме мощностей, поглощаемых всеми приемниками (резисторами):

$$\sum_{k=1}^n e_k I_k = \sum_{k=1}^n I_k^2 r_k. \quad (2.55)$$

Если у какого-либо источника электроэнергии действительное направление тока противоположно направлению ЭДС, то мощность такого источника следует считать отрицательной — он является не источником, а приемником энергии (например, заряжающийся аккумулятор).

Пример 3. Соединение источников тока.

Пусть n одинаковых источников тока соединены последовательно и замкнуты на внешнюю цепь (рис. 2.11). Обозначим ЭДС каждого источника e_1 , его внутреннее сопротивление — r_1 , а сопротивление внешней цепи — R .

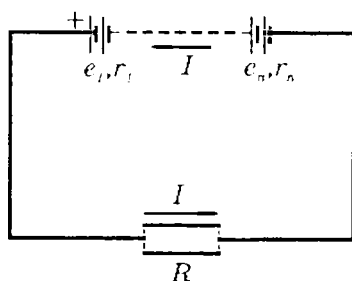


Рис. 2.11

Тогда второе правило Кирхгофа дает:

$$I(nr_1 + R) = ne_1. \quad (2.56)$$

Сравнивая эту формулу с законом Ома для замкнутой цепи (2.37), мы видим, что батарея действует как один источник тока, у которого ЭДС e и внутреннее сопротивление r имеют значения:

$$e = ne_1, \quad r = nr_1. \quad (2.57)$$

При последовательном соединении n одинаковых источников тока ЭДС батареи и ее внутреннее сопротивление в n раз больше, чем у одного источника.

Рассмотрим теперь параллельное соединение источников тока, показанное на рис. 2.12.

В этом случае все положительные полюсы отдельных источников и все отрицательные полюсы соединяются между собой и образуют два полюса (a и b) батареи. Выберем положительные направления токов, как показано на рис. 2.12, и применим к этой цепи оба правила Кирхгофа. Первое правило для точки a дает:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_m. \quad (2.58)$$

Применяя второе правило к отдельным простым контурам цепи, получим:

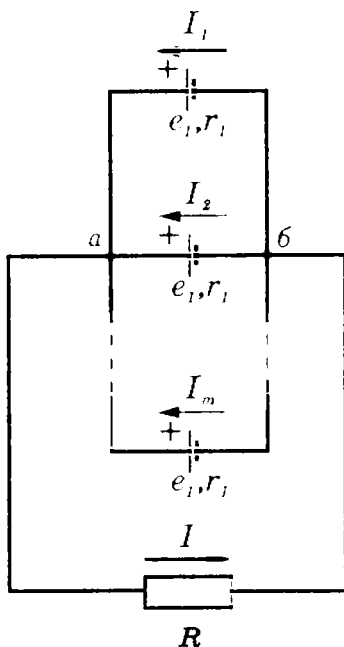


Рис. 2.12

$$\begin{aligned}
 I_1 r_1 - I_2 r_1 &= e_1 - e_1 = 0; \\
 I_2 r_1 - I_3 r_1 &= 0; \\
 &\dots\dots\dots \\
 I_m r_1 - I_m r_1 &= 0; \\
 IR + I_m r_1 &= e_1.
 \end{aligned}
 \tag{2.59}$$

Из этих уравнений, кроме последнего, мы найдем:

$$I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_m = \frac{I}{m}.
 \tag{2.60}$$

Последнее же уравнение после этого дает:

$$I \left(R + \frac{r_1}{m} \right) = e_1. \quad (2.61)$$

Отсюда видно, что такая батарея действует как один источник, для которого

$$e = e_1 \text{ и } r = \frac{r_1}{m}. \quad (2.62)$$

При параллельном соединении m одинаковых источников тока ЭДС батареи равна ЭДС одного источника, а внутреннее сопротивление батареи в m раз меньше, чем у одного источника.

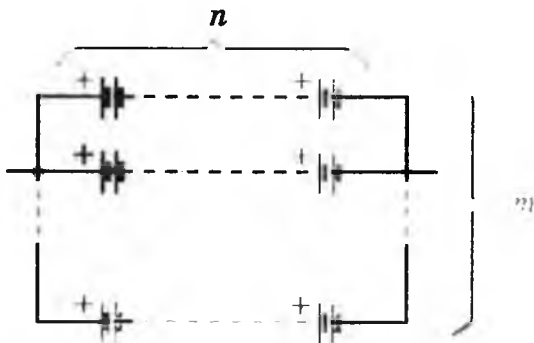


Рис. 2.13

На рис. 2.13 показано *смешанное* соединение источников тока. Такая батарея состоит из m параллельно соединенных звеньев, в каждом из которых содержится n последовательно соединенных источников тока. Легко понять, что ЭДС и внутреннее сопротивление этой батареи имеют значения

$$e = ne. \text{ и } r = r \frac{n}{m}. \quad (2.63)$$

Пользуясь соединением источников тока в батарее, можно изменять ЭДС и внутреннее сопротивление в широких пределах и получать такие их значения, которые необходимы для питания данной внешней цепи.

Вопросы для повторения

1. Что такое электрический ток?
2. Что такое сила и плотность тока? В каких единицах они измеряются?
3. Какова причина электрического сопротивления?
4. В каких единицах измеряется сопротивление?
5. От чего зависит сопротивление проводника?
6. Что такое удельное сопротивление?
7. Что такое проводимость и удельная проводимость?
8. Какой формулой описывается зависимость сопротивления проводников от температуры?
9. Чему равно общее сопротивление последовательно соединенных проводников?
10. Чему равно общее сопротивление параллельно соединенных проводников?
11. Как распределяются токи в параллельно соединенных проводниках?
12. Запишите формулы для вычисления работы и мощности электрического тока.
13. Сформулируйте закон Джоуля-Ленца.
14. Что такое потеря напряжения в линии?
15. Как влияет напряжение в линии электропередачи на потери мощности в проводах?
16. Что такое ЭДС источника тока?
17. Сформулируйте закон Ома для замкнутой цепи.
18. Сформулируйте первое правило Кирхгофа.

19. Сформулируйте второе правило Кирхгофа.
20. Сформулируйте правило знаков при использовании правил Кирхгофа.
21. Что такое шунтирование?
22. Чему равны ЭДС и внутреннее сопротивление батареи при последовательном соединении источников тока?
23. Чему равны ЭДС и внутреннее сопротивление батареи при параллельном соединении источников тока?

Глава 3. Электромагнетизм

3.1. Взаимодействие токов. Магнитное поле

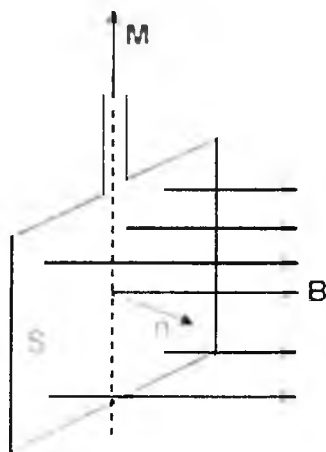
Еще в глубокой древности была известна руда, обладающая свойством притягивать железо. Такая руда представляет собой химическое соединение железа с кислородом и является природным магнитом.

В технике применяются не природные, а искусственные постоянные магниты. Искусственным магнитом называется намагниченный кусок специального сплава или керамического материала. Постоянные магниты могут иметь различную форму: прямоугольную, подковообразную, кольцеобразную и т. д.

Каждый постоянный магнит имеет два полюса – северный и южный. С помощью компаса легко убедиться в том, что магнитная стрелка, вращающаяся на острие, устанавливается всегда так, что один ее полюс направлен на север, а другой – на юг. Полюс, направленный на север, обозначается буквой N, а полюс, направленный на юг, – буквой S. Магниты взаимодействуют между собой – одноименные полюсы магнитов взаимно отталкиваются, а разноименные – притягиваются.

В 1820 г. А. Ампер (1775–1836) установил, что если токи в двух прямолинейных параллельных проводниках имеют одинаковые направления, то они притягивают друг друга, если же направления токов противоположны, то проводники отталкивают друг друга. Взаимодействие токов осуществляется посредством поля, которое было названо магнитным. Электрический ток создает в окружающем пространстве *магнитное поле*. В отличие от электростатического поля, которое создается неподвижными электрическими зарядами, магнитное поле появляется лишь при движении зарядов. Название поля связано с тем, что, как обнаружил в 1820 г. Х. Эрстед (1777–1851), поле, возбуждаемое током, оказывает ориентирующее действие на магнитную стрелку.

Магнитное поле характеризуется вектором магнитной индукции B , величина которого определяет силу, действующую в данной точке поля на движущийся заряд, или момент сил, действующий на замкнутый контур (рамку) с током.



Если в магнитное поле с индукцией B внести рамку с током (рис. 3.1), то величина вращательного момента сил, действующего на рамку,

$$M = ISB \sin \alpha, \quad (3.1)$$

где α – угол между вектором нормали к рамке \vec{n} и B ; S – площадь рамки. Когда $\alpha = 90^\circ$, $\sin \alpha = 1$ и момент сил принимает максимальное значение $M_{\max} = ISB$, откуда

$$B = \frac{M_{\max}}{IS}. \quad (3.2)$$

Таким образом, *магнитная индукция – это величина, численно равная единичному максимальному вращательному моменту, действующему на рамку, имеющую единичную площадь, если в рамке течет единичный ток.*

Магнитная индукция измеряется в *тесла* (Тл). 1 Тл – индукция такого магнитного поля, в котором на рамку площадью 1 м^2 при силе тока в 1 А действует максимальный вращательный момент сил $1 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Магнитное поле изображают линиями магнитной индукции аналогично линиям напряженности электростатического поля. Это такие линии, касательные к которым направлены так же, как вектор B в данной точке поля. Принято считать, что магнитные силовые линии направлены от северного полюса к южному. Направление магнитных силовых линий создаваемых током, а следовательно, и направление вектора B определяют с помощью правила буравчика, которое формулируется следующим образом: *если поступательное движение правого буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление линий магнитной индукции совпадает с направлением вращательного движения его рукоятки.* Например, линии индукции поля прямого тока представляют систему охватывающих проводник concentрических окружностей (рис. 3.2).

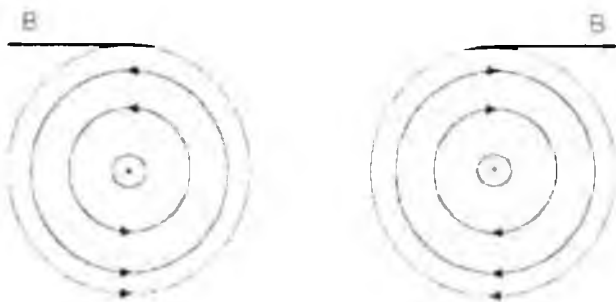


Рис. 3.2

Важнейшей особенностью линий магнитной индукции является их *замкнутость*, а это отражает тот факт, что *в природе нет магнитных зарядов*, на которых начинались бы или заканчивались линии магнитной индукции, т.е. в противоположность электростатическому полю магнитное поле не имеет источников.

На проводник с током в магнитном поле действует сила. Ампер установил, что на прямолинейный проводник длиной l , по которому течет ток с силой I , в магнитном поле с индукцией B действует сила

$$F = IBl \sin \alpha, \quad (3.3)$$

где α — угол между направлением тока и вектором магнитной индукции B , F — сила Ампера. Уравнение (3.3) называют *законом Ампера*. Направление силы F определяется с помощью правила левой руки: *если ладонь левой руки расположить так, чтобы линии вектора магнитной индукции входили в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока, то большой палец, отогнутый на 90° , укажет направление силы Ампера*.

Согласно закону Ампера, на проводник с током в магнитном поле действует сила (3.3). Так как ток представляет упорядоченное движение зарядов, то,

следовательно, и на всякий движущийся заряд в магнитном поле действует сила. Ее называют *силой Лоренца*.

Если концентрация зарядов в проводнике — n_0 , а средняя скорость их упорядоченного движения — v , то сила тока

$$I = qn_0vS, \quad (3.4)$$

где q — заряд, S — площадь поперечного сечения проводника. Если проводником является металл, то $q = e$, где e — заряд электрона. Подставляя (3.4) в (3.3), получим

$$F = Bn_0evSl \sin \alpha = Bn_0evV \sin \alpha, \quad (3.5)$$

где $V = Sl$ — объем проводника, $n_0V = N$ — число зарядов (электронов) в объеме V . Таким образом,

$$F = BevN \sin \alpha. \quad (3.6)$$

Разделив обе части формулы (3.6) на N , получим силу, действующую на один электрон:

$$f = Bev \sin \alpha. \quad (3.7)$$

Это и есть сила Лоренца. В формуле (3.7) α — угол между векторами \vec{v} и \vec{B} . Вектор \vec{f} перпендикулярен и вектору \vec{v} , и вектору \vec{B} . Направление силы \vec{f} можно определить, используя правило левой руки (рис. 3.3).

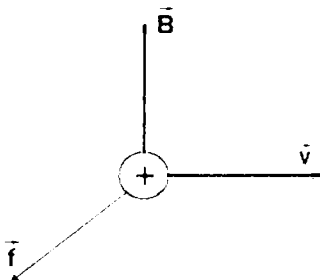


Рис. 3.3

Из формулы (3.7) видно, что магнитное поле не действует на заряженную частицу в двух случаях:

- 1) когда частица неподвижна ($v = 0$);
- 2) когда частица движется вдоль линий индукции магнитного поля ($\sin \alpha = 0$, $\alpha = 0$, $v \parallel B$).

3.2. Магнитные свойства веществ

Опыт показывает, что все вещества в магнитном поле намагничиваются, изменяя тем самым первоначальное внешнее поле. Их называют магнетиками. При этом одни вещества ослабляют внешнее поле, их называют *диамагнетиками*, а другие усиливают его. Их называют *парамагнетиками*. Подавляющее большинство веществ – диамагнетики (например, фосфор, сера, углерод, золото, серебро, медь, свинец и др.). Парамагнетиками являются кислород, азот, алюминий, платина и др. Причина диа- и парамагнетизма состоит в следующем.

В атомах любого вещества имеются *круговые*, или *орбитальные*, токи, образованные движением электронов вокруг ядер (эта идея была впервые высказана Ампером и получила название гипотезы Ампера). Орбитальному току соответствует определенный магнитный момент, который называется *орбитальным магнитным моментом*:

$$p_m = I_e S, \quad (3.8)$$

где I_e – сила орбитального (электронного) тока, S – площадь орбиты электрона. Помимо этого, электроны обладают *собственным*, или *спиновым*, *магнитным моментом*. Первоначально предполагалось, что спиновый магнитный момент обусловлен вращением электрона вокруг своей оси. В дальнейшем выяснилось, что спиновый магнитный момент является таким же неотъемлемым свойством электрона,

как его масса и заряд. Собственным магнитным моментом обладает и ядро атома.

Геометрическая сумма орбитальных и спиновых магнитных моментов электронов и собственного магнитного момента ядра образует магнитный момент атома. У диамагнетиков магнитный момент атома равен нулю, так как орбитальные, спиновые и ядерные моменты скомпенсированы. Под воздействием внешнего магнитного поля у атомов диамагнетика появляется магнитный момент, направленный против внешнего поля. Диамагнетик намагничивается, создавая собственное магнитное поле, направленное против внешнего поля и ослабляющее его. При исчезновении внешнего поля магнитные моменты атомов исчезают и диамагнетик размагничивается.

В парамагнетиках атомы всегда обладают магнитным моментом. Однако эти магнитные моменты направлены беспорядочно и парамагнетик в целом не намагничен. Внешнее поле ориентирует магнитные моменты преимущественно в направлении поля. Парамагнетик намагничивается, создавая собственное магнитное поле, совпадающее по направлению с внешним полем и усиливающее его. При исчезновении внешнего поля парамагнетик размагничивается.

Таким образом, если в вакууме существует магнитное поле с индукцией B , то при заполнении некоторой средой результирующее поле либо ослабляется, либо усиливается.

Величина, показывающая, во сколько раз индукция результирующего поля в магнетике B' , больше или меньше индукции внешнего магнитного поля, называется *относительной магнитной проницаемостью магнетика*:

$$\mu = \frac{B'}{B}. \quad (3.9)$$

Относительная магнитная проницаемость μ – безразмерная величина. Она характеризует магнитные свойства магнетика (среды), его способность намагничиваться под действием внешнего поля. Для вакуума – $\mu = 1$, у диамагнетиков – $\mu < 1$, у парамагнетиков – $\mu > 1$. Магнитная проницаемость и диамагнетиков и парамагнетиков мало отличается от единицы. Например, у одного из самых сильных диамагнетиков – висмута – $\mu = 0,999824$, у наиболее сильных парамагнетиков – жидкого кислорода и платины – соответственно $\mu = 1,0034$ и $\mu = 1,00036$.

✓ Среди парамагнетиков резко выделяется группа веществ, вызывающих большое усиление внешнего поля. Их называют *ферромагнетиками*. Ферромагнетиками являются железо, никель, кобальт и их соединения. У ферромагнетиков магнитный момент отличен от нуля в отсутствие внешнего магнитного поля не только у отдельных атомов, но и у целых областей магнетика размерами порядка $10^2 - 10^3$ см (рис.3.4). Это явление называется *ферромагнетизмом*.

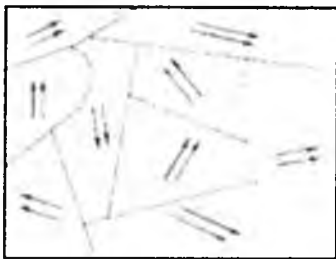


Рис. 3.4

Области самопроизвольного намагничивания ферромагнетика называются *доменами*. Магнитные моменты всех доменов по всему объему ферромагнетика ориентированы беспорядочно, поэтому результирующий магнитный момент всего ферромагнетика

в отсутствие внешнего магнитного поля равен нулю. Если ферромагнетик поместить в магнитное поле, то магнитные моменты отдельных доменов получают преимущественную ориентацию в направлении поля. Чем больше индукция внешнего поля B , тем сильнее эта ориентация, тем сильнее намагничивается ферромагнетик.

При некоторой достаточной величине внешнего поля все магнитные моменты доменов оказываются ориентированными вдоль поля, т.е. наступает состояние *насыщения*. При этом собственное магнитное поле ферромагнетика превосходит во много раз внешнее поле, поэтому результирующее магнитное поле в ферромагнетике значительно больше внешнего. Если ферромагнетик вынести из внешнего поля, то размагничивания не произойдет, хотя результирующее по мере ослабления внешнего поля будет уменьшаться. Когда индукция внешнего магнитного поля станет равной нулю, индукция магнитного поля ферромагнетика будет больше нуля.

Величина индукции магнитного поля ферромагнетика, оставшегося после снятия внешнего магнитного поля, называется *остаточной намагниченностью* $B_{ост}$. Чтобы ферромагнетик полностью размагнитить, нужно изменить направление внешнего поля на противоположное и постепенно увеличивать его. При некоторой величине этого поля ферромагнетик окажется полностью размагниченным. Величина такого поля называется *коэрцитивной силой* ферромагнетика B_k . Если дальше увеличивать индукцию магнитного поля, направленного противоположно первоначальному, то вновь будет достигнуто состояние насыщения.

Если теперь уменьшить внешнее поле до нуля, а затем, изменив еще раз его направление, т.е. сделав его прежним, вновь его увеличить, то на графике

$B' = f(B / \mu_0)$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^7$ Гн/м – магнитная постоянная, получим замкнутую кривую, которая называется *петлей гистерезиса* (рис. 3.5).

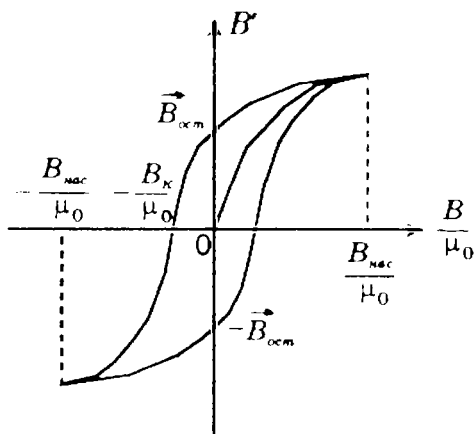


Рис. 3.5

Величина коэрцитивной силы B_k / μ_0 зависит от свойств ферромагнетика. Бывают ферромагнетики с малой коэрцитивной силой. Их называют *мягкими*. Они имеют узкую петлю гистерезиса и применяются для изготовления сердечников трансформаторов, в статорах и роторах электродвигателей и генераторов тока. Ферромагнетики с большой коэрцитивной силой имеют широкую петлю гистерезиса. Их называют *жесткими*. В отличие от мягких жесткие ферромагнетики перемагничиваются с трудом.

При определенной для каждого ферромагнетика температуре, называемой *точкой Кюри*, они теряют свои магнитные свойства. Например, у железа точка Кюри – 770°C , а у никеля – 360°C . При температуре выше точки Кюри ферромагнетик превращается в обычный парамагнетик.

3.3. Электромагнитная индукция. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца

Явление электромагнитной индукции было открыто Фарадеем в 1831 г. Опыты Фарадея показали, что во всяком замкнутом проводящем контуре при изменении числа линий магнитной индукции, проходящих через него, возникает электрический ток. Этот ток был назван *индукционным током*. Например, в момент вдвигания магнита и в момент его выдвигания из катушки наблюдается отклонение стрелки гальванометра (рис. 3.6).

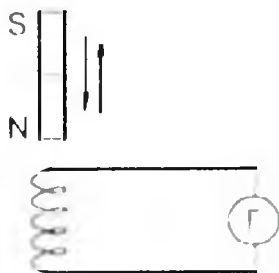


Рис. 3.6

Отклонения стрелки при вдвигании и выдвигании магнита противоположны. Отклонения тем больше, чем быстрее двигается магнит. Если вдвигать и выдвигать в катушку магнит другим полюсом, то отклонения стрелки будут противоположны первоначальному.

В другом опыте одна из катушек K_1 находится внутри другой катушки K_2 (рис. 3.7).

В момент включения или выключения тока через катушку K_1 , или его изменения, или при перемещении катушек друг относительно друга наблюдаются отклонения стрелки гальванометра.

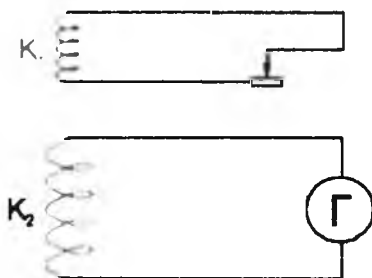


Рис. 3.7

Полное число линий магнитной индукции через площадь контура представляет *магнитный поток*. Таким образом, *причиной возникновения индукционного тока является изменение магнитного потока через контур*. Если контур расположен в однородном магнитном поле, индукция которого B , то магнитный поток через контур, площадь которого S ,

$$\Phi = BS \cos \alpha \quad (3.10)$$

где α – угол между вектором B и нормалью n к поверхности контура (рис. 3.8).



Рис. 3.8

Магнитный поток – скалярная величина. Если линии вектора B выходят из площадки, то магнитный поток считается положительным. Если же они входят в площадку, то отрицательным.

В системе СИ единицей магнитного потока является *вебер* (Вб). 1 Вб – это магнитный поток, создаваемый однородным магнитным полем индукцией 1 Тл сквозь площадку 1 м², перпендикулярную линиям индукции: 1 Вб = 1 Тл · м².

Возникновение индукционного тока означает, что при изменении магнитного потока Φ в контуре возникает ЭДС индукции. Она определяется скоростью изменения магнитного потока, т.е.

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (3.11)$$

Формула (3.11) выражает закон электромагнитной индукции, или закон Фарадея. Знак минус есть математическое выражение правила Ленца, которое гласит, что индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать причине, его вызывающей. Иначе говоря, индукционный ток создает магнитный поток, препятствующий изменению магнитного потока, вызывающего ЭДС индукции.

3.4. Самоиндукция. Индуктивность

Если в контуре течет переменный ток, то в этом контуре возникает ЭДС индукции, так как ток создает через контур переменный магнитный поток, величина которого изменяется в соответствии с изменениями тока. Возникающая ЭДС создает дополнительный ток в контуре. Это явление называется *самоиндукцией*, а дополнительные токи – *экстратоками самоиндукции*. Индукция магнитного поля пропорциональна току, следовательно, величина магнитного потока через контур также пропорциональна току:

$$\Phi = LI, \quad (3.12)$$

где L – коэффициент самоиндукции или индуктивность контура, зависящая от формы и размеров, а также от свойств окружающей среды. Применяя к явлению самоиндукции закон электромагнитной индукции Фарадея, получим:

$$e = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = - L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (3.13)$$

ЭДС самоиндукции, возникающая в контуре при изменении тока в нем, прямо пропорциональна скорости изменения этого тока.

Индуктивность контура численно равна ЭДС самоиндукции, возникающей в нем при изменении тока на единицу за единицу времени.

Индуктивность является аналогом массы, так как чем больше индуктивность, тем труднее изменить силу тока в контуре.

В системе СИ индуктивность измеряется в генри (Гн). 1 Гн – это индуктивность такого контура, в котором возникает ЭДС самоиндукции 1 В при изменении тока в нем на 1 А за 1 с.

В качестве примера вычислим индуктивность катушки (соленоида). Пусть число витков соленоида – N , площадь поперечного сечения витка – S , длина соленоида – l , а полость соленоида заполнена средой с относительной магнитной проницаемостью μ . При протекании по обмотке соленоида тока I внутри соленоида возникает однородное поле, индукция которого

$$B = \mu_0 n I, \quad (3.14)$$

где $n = N/l$ – число витков на единицу длины катушки. Магнитный поток через каждый из витков равен BS , а через все витки

$$\Phi = NBS = n l B S. \quad (3.15)$$

Подставляя значение B из (3.14), получим:

$$\Phi = \mu\mu_0 n^2 l S I. \quad (3.16)$$

Сравнивая (3.12) и (3.16), имеем

$$L = \mu\mu_0 n^2 l S = \mu\mu_0 n^2 V, \quad (3.17)$$

где $V = lS$ – объем соленоида, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

Вопросы для повторения

1. Как взаимодействуют полюсы магнитов?
2. Какой величиной характеризуется магнитное поле?
3. Как графически изображается магнитное поле?
4. Сформулируйте правило буравчика.
5. Запишите закон Ампера.
6. Сформулируйте правило левой руки.
7. Что такое сила Лоренца? Чему она равна?
8. Какие материалы называются диамагнетиками? Парамагнетиками? Ферромагнетиками?
9. Какова природа диамагнетизма и парамагнетизма?
10. Что такое магнитная проницаемость?
11. Что такое остаточная намагниченность?
12. Что такое коэрцитивная сила?
13. Изобразите петлю гистерезиса.
14. Что такое точка Кюри?
15. Чему равен магнитный поток через контур? В каких единицах он измеряется?
16. Запишите закон электромагнитной индукции.
17. Сформулируйте правило Ленца.
18. В чем состоит явление самоиндукции?
19. По какой формуле можно вычислить ЭДС самоиндукции?
20. В каких единицах измеряется индуктивность?
21. С помощью какой формулы можно вычислить индуктивность соленоида?

Глава 4. Однофазный переменный ток

4.1. Получение переменного тока

До конца XIX в. использовались только источники постоянного тока – химические элементы и генераторы. Это ограничивало возможности передачи электрической энергии на большие расстояния. Как известно, для уменьшения потерь в линиях электропередачи необходимо использовать очень высокое напряжение. Однако получить достаточно высокое напряжение от генератора постоянного тока практически невозможно. Проблема передачи электрической энергии на большие расстояния была решена только при использовании переменного тока и трансформаторов.

Переменный ток имеет ряд преимуществ по сравнению с постоянным: генератор переменного тока значительно проще и дешевле генератора постоянного тока; переменный ток можно трансформировать; переменный ток легко преобразуется в постоянный; двигатели переменного тока значительно проще и дешевле, чем двигатели постоянного тока.

В принципе переменным током можно назвать всякий ток, который с течением времени изменяет свою величину, но в технике переменным током

называют такой ток, который периодически изменяет и величину, и направление. Причем среднее значение силы такого тока за период T равно нулю. Периодическим переменный ток называется потому, что через промежутки времени, кратные T , характеризующие его физические величины принимают одинаковые значения. Русское название «переменный» не вполне точно отражает это обстоятельство (более точен английский термин «*alternating*» – чередующийся). При изучении электричества и электротехники вам встретятся различные токи, которые изменяются (не периодически) по величине, а не по направлению – они переменными в указанном смысле не являются. Например, токи замыкания и размыкания цепей постоянного тока, содержащих индуктивности и (или) емкости, нельзя считать переменными.

В электротехнике наибольшее распространение получил синусоидальный переменный ток, т.е. ток, величина которого изменяется по закону синуса (или косинуса), обладающий рядом достоинств по сравнению с другими периодическими токами.

Переменный ток промышленной частоты получают на электростанциях с помощью генераторов переменного тока (трехфазных синхронных генераторов). Это довольно сложные электрические машины, которые мы будем изучать в конце курса электротехники. Сейчас мы рассмотрим только физические основы их действия, т.е. идею получения переменного тока.

Пусть в однородном магнитном поле постоянного магнита равномерно вращается с угловой скоростью ω рамка площадью S (рис. 4.1).
Магнитный поток через рамку

$$\Phi = BS \cos \alpha, \quad (4.1)$$

где α — угол между нормалью к рамке \vec{n} и вектором магнитной индукции \vec{B} .

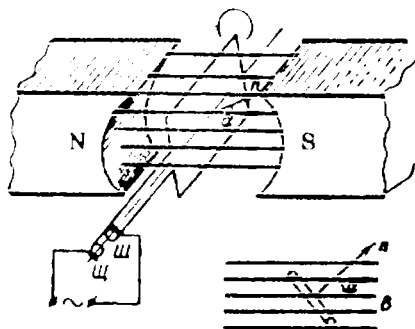


Рис. 4.1

Поскольку при равномерном вращении рамки

угловая скорость $\omega = \frac{\alpha}{t}$, то угол α будет изменяться

по закону $\alpha = \omega t$, и формула (4.1) примет вид

$$\Phi = BS \cos \omega t \quad (4.2)$$

Величину ω также называют *круговой частотой*.

Поскольку при вращении рамки пересекающий ее магнитный поток все время меняется, то по закону электромагнитной индукции в ней будет наводиться ЭДС индукции

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \sin \omega t = E_0 \sin \omega t, \quad (4.3)$$

где $E_0 = BS\omega$ — амплитуда синусоидальной ЭДС. Таким образом, в рамке возникнет синусоидальная ЭДС, а если замкнуть рамку на нагрузку, то в цепи потечет синусоидальный ток.

Значение переменной ЭДС (а также тока и напряжения) в данный момент времени называется *мгновенным значением*.

Величину $\omega t = \frac{2\pi}{T}t - 2\pi ft$, стоящую под знаком синуса или косинуса, называют *фазой колебаний*, описываемых этими функциями. Фаза определяет значение ЭДС в любой момент времени t . Фаза измеряется в градусах или в радианах. Величина f называется *частотой колебаний*, и она связана с круговой частотой соотношением $\omega = 2\pi f$.

Время T одного полного изменения ЭДС (это время одного оборота рамки) называют *периодом ЭДС*. Изменение ЭДС со временем может быть изображено на временной диаграмме (рис. 4.2).

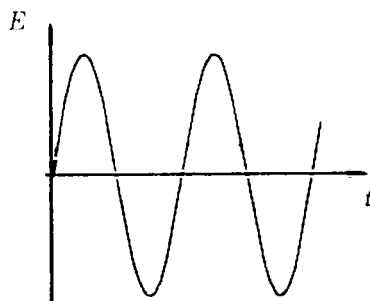


Рис. 4.2

Частота колебаний связана с периодом соотношением $f = \frac{1}{T}$. Если период измеряется в секундах, то частота в *герцах* (Гц). В большинстве стран, включая Россию, промышленная частота переменного тока составляет 50 Гц (в США и Японии – 60 Гц).

Величина промышленной частоты переменного тока обусловлена технико-экономическими соображениями. Если она слишком низка, то увеличиваются габариты электрических машин и, следовательно-

но, расход материалов на их изготовление; заметным становится мигание света в электрических лампочках. При слишком высоких частотах увеличиваются потери энергии в сердечниках электрических машин и трансформаторах. Поэтому наиболее оптимальными оказались частоты 50–60 Гц. Однако в некоторых случаях используются переменные токи как с более высокой, так и с более низкой частотой. Например, в самолетах применяется частота 400 Гц. На этой частоте можно значительно уменьшить габариты и вес трансформаторов и электромоторов, что для авиации более существенно, чем увеличение потерь в сердечниках. На железных дорогах используют переменный ток с частотой 25 Гц и даже 16,66 Гц.

4.2 Действующие значения тока и напряжения

Для описания характеристик переменного тока необходимо избрать определенные физические величины. Мгновенные и амплитудные значения для этих целей неудобны, а средние значения за период равны нулю. Поэтому вводят понятие *действующих значений тока и напряжения*. Они основаны на тепловом действии тока, не зависящем от его направления.

Действующими значениями тока и напряжения называют соответствующие параметры такого постоянного тока, при котором в данном проводнике за данный промежуток времени выделяется столько же теплоты, что и при переменном токе.

При изменении тока по синусоиде его действующее значение меньше его амплитудного значения в $\sqrt{2}$ раз, т. е.

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0.707 I_m \quad (4.4)$$

Такое же соотношение справедливо для ЭДС и напряжения:

$$E = \frac{U}{\sqrt{2}}. \quad (4.5)$$

Действующие значения обозначаются прописными латинскими буквами без индексов.

Электроизмерительные приборы переменного тока проградуированы в действующих значениях измеряемых величин. В некоторых книгах действующие значения называют эффективными значениями. Это — синонимы.

4.3. Метод векторных диаграмм

Метод векторных диаграмм, т. е. изображение величин, характеризующих переменный ток векторами, а не тригонометрическими функциями, чрезвычайно удобен. Поэтому кратко изложим его основы.

Переменный ток в отличие от постоянного характеризуется двумя скалярными величинами — амплитудой и фазой. Поэтому для математического описания переменного тока необходим математический объект, также характеризующийся двумя скалярными величинами. Существуют два таких математических объекта (из известных вам) — это вектор на плоскости и комплексное число. В теории электрических цепей и те и другие используются для описания переменных токов.

При описании электрической цепи переменного тока с помощью векторных диаграмм каждому току и напряжению сопоставляется вектор на плоскости в полярных координатах, длина которого равна амплитуде тока или напряжения, а полярный угол равен соответствующей фазе. Поскольку фаза переменного тока зависит от времени, то считается, что

все векторы вращаются против часовой стрелки с частотой переменного тока. Векторная диаграмма строится для фиксированного момента времени.

Более подробно построение и использование векторных диаграмм будет изложено ниже на примерах конкретных цепей.

4.4. Цепь переменного тока с активным сопротивлением

Рассмотрим цепь (рис. 4.3), в которой к активному сопротивлению (резистору) приложено синусоидальное напряжение:

$$U(t) = U_0 \sin \omega t. \quad (4.6)$$

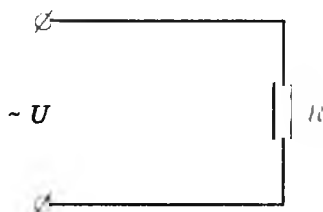


Рис. 4.3

Тогда по закону Ома ток в цепи будет равен:

$$I(t) = \frac{U(t)}{R} = \frac{U_0}{R} \sin \omega t = I_0 \sin \omega t \quad (4.7)$$

Мы видим, что ток и напряжение совпадают по фазе. Векторная диаграмма для этой цепи приведена на рис. 4.4, а зависимости тока и напряжения от времени (временная диаграмма) – на рис. 4.5:

Выясним, как изменяется со временем мощность в цепи переменного тока с резистором. Мгновенное

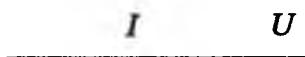


Рис. 4.4

значение мощности равно произведению мгновенных значений тока и напряжения:

$$p(t) = i(t)u(t) = \frac{I_m U_m}{2} (1 - \cos 2\omega t). \quad (4.8)$$

Из этой формулы мы видим, что мгновенная мощность всегда положительна и пульсирует с удвоенной частотой (рис 4.5).

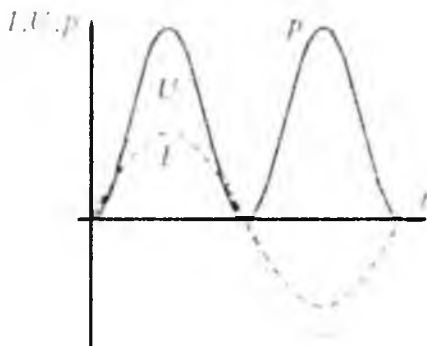


Рис. 4.5

Это означает, что электрическая энергия необратимо превращается в теплоту независимо от направления тока в цепи.

Те элементы цепи, на которых происходит необратимое преобразование электрической энергии в другие виды энергии (не только в теплоту), называются *активными сопротивлениями*. Поэтому резистор представляет собой активное сопротивление.

4.5. Цепь переменного тока с индуктивностью

Рассмотрим цепь (рис. 4.6), в которой к катушке индуктивности L , не обладающей активным сопротивлением ($R = 0$), приложено синусоидальное напряжение (4.6).

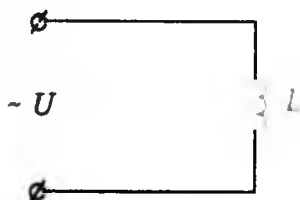


Рис. 4.6

Протекающий через катушку переменный ток создает в ней ЭДС самоиндукции e_L , которая в соответствии с правилом Ленца направлена таким образом, что препятствует изменению тока. Другими словами, ЭДС самоиндукции направлена навстречу приложенному напряжению. Тогда в соответствии со вторым правилом Кирхгофа можно записать:

$$U + e_L = 0. \quad (4.9)$$

Согласно закону Фарадея ЭДС самоиндукции

$$e_L = -L \frac{dI}{dt}. \quad (4.10)$$

Подставив (4.10) в (4.9), получим:

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{e_L}{L} = \frac{U}{L} = \frac{U}{L} \sin \omega t. \quad (4.11)$$

Решение этого дифференциального уравнения имеет вид:

$$I = I_0 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right), \quad (4.12)$$

где

$$I_0 = \frac{U_0}{\omega L}. \quad (4.13)$$

Деля обе части равенства (4.13) на $\sqrt{2}$, получим для действующих значений

$$I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{x_L}. \quad (4.14)$$

Соотношение (4.14) представляет собой закон Ома для цепи с идеальной индуктивностью, а величина $x_L = \omega L$ называется *индуктивным сопротивлением*. Индуктивное сопротивление измеряется в омах.

Из формулы (4.12) мы видим, что в рассмотренной цепи ток отстает по фазе от напряжения на $\pi/2$. Векторная диаграмма для этой цепи изображена на рис. 4.7, а временная – на рис. 4.8.

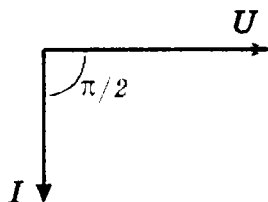


Рис. 4.7

Мгновенная мощность в цепи с чисто индуктивным сопротивлением равна:

$$p(t) = I_0 U_0 \sin \omega t \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = -\frac{I_0 U_0}{2} \sin 2\omega t. \quad (4.15)$$

Мы видим, она изменяется по закону синуса с удвоенной частотой (рис. 4.8).

Положительные значения мощности соответствуют потреблению энергии катушкой, а отрицатель-

ные – возврату запасенной энергии обратно источнику. Средняя за период мощность равна нулю. Следовательно, цепь с индуктивностью мощности не потребляет – это чисто *реактивная* нагрузка. В этой цепи происходит лишь перекачивание электричес-

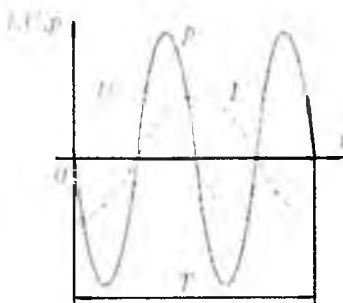


Рис. 4.8

кой энергии от источника в катушку и обратно. Индуктивное сопротивление является *реактивным сопротивлением*.

4.6. Цепь переменного тока с индуктивностью и активным сопротивлением

Реальные цепи, содержащие индуктивность, всегда имеют и активное сопротивление: сопротивление провода обмотки и подводящих проводов. Поэтому рассмотрим электрическую цепь (рис. 4.9), в которой через катушку индуктивности L , обладающую активным сопротивлением R , протекает переменный ток

$$I = I_0 \sin \omega t . \quad (4.16)$$

Через катушку и резистор протекает один и тот же ток, поэтому в качестве основного выберем век-

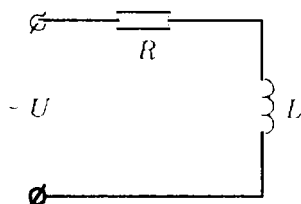


Рис. 4.9

тор тока и будем строить вектор напряжения, приложенного к этой цепи.

Напряжение, приложенное к цепи, равно векторной сумме падений напряжений на катушке индуктивности и на резисторе:

$$\dot{U} = \dot{U}_L + \dot{U}_R. \quad (4.17)$$

Напряжение на резисторе, как было показано выше, будет совпадать по фазе с током:

$$U_R = U_{oR} \sin \omega t, \quad (4.18)$$

а напряжение на индуктивности будет равно ЭДС самоиндукции со знаком минус (по второму правилу Кирхгофа):

$$U_L = L \frac{dI}{dt} = I_o \omega L \cos \omega t = U_{oL} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (4.19)$$

Мы видим, что напряжение на индуктивности опережает ток на угол $\pi/2$. Построив векторы \dot{I} , \dot{U}_R и \dot{U}_L и воспользовавшись формулой (4.17), найдем вектор \dot{U} . Векторная диаграмма показана на рис. 4.10.

Мы видим, что в рассматриваемой цепи ток \dot{I} отстает по фазе от приложенного напряжения \dot{U} , но не на $\pi/2$, как в случае чистой индуктивности, а на некоторый угол φ . Этот угол может принимать значения от 0 до $\pi/2$ и при заданной индуктивности зависит от значения активного сопротивления: с увеличением R угол φ уменьшается.

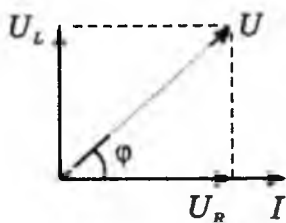


Рис. 4.10

Как видно из векторной диаграммы, модуль вектора U равен

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} = I\sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = IZ_1, \quad (4.20)$$

где величина

$$Z_1 = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (4.21)$$

называется полным сопротивлением цепи.

Сдвиг по фазе φ между током и напряжением в данной цепи также определяется из векторной диаграммы:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L}{U_R} = \frac{\omega L}{R} \quad (4.22)$$

4.7. Цепь переменного тока с емкостью

Рассмотрим электрическую цепь, в которой переменное напряжение (4.6) приложено к емкости C (рис. 4.11).

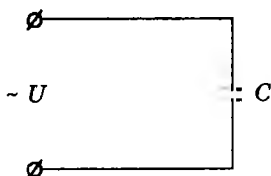


Рис. 4.11

Мгновенное значение тока в цепи с емкостью равно скорости изменения заряда на обкладках конденсатора:

$$I = \frac{dq}{dt}, \quad (4.23)$$

но поскольку $q = CU$, то

$$I = C \frac{dU}{dt} = \omega CU_0 \cos \omega t = I_0 \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}), \quad (4.24)$$

где

$$\omega CU_0 = I_0. \quad (4.25)$$

Мы видим, что в этой цепи ток опережает напряжение на $\pi/2$. Переходя в формуле (4.25) к действующим

значениям переменного тока ($I = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$, $U = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$), получим:

$$I = \frac{U}{x_c}. \quad (4.26)$$

Это закон Ома для цепи переменного тока с емкостью, а величина $x_c = \frac{1}{\omega C}$ называется емкост-

ным сопротивлением. Векторная диаграмма для этой цепи показана на рис. 4.12, а временная — на рис. 4.13.

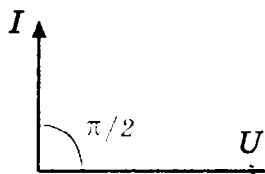


Рис. 4.12

Мгновенная мощность в цепи, содержащей емкость:

$$p(t) = I_0 U_0 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \sin \omega t = IU \sin 2\omega t. \quad (4.27)$$

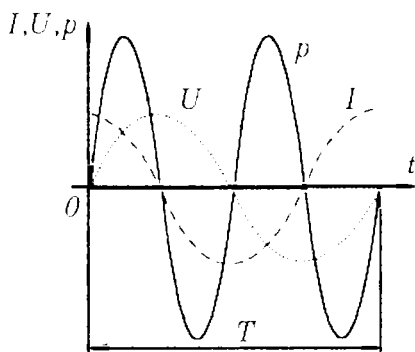


Рис. 4.13

Мы видим, что мгновенная мощность изменяется с удвоенной частотой (рис. 4.13). При этом положительные значения мощности соответствуют заряду конденсатора, а отрицательные – его разряду и возврату запасенной энергии в источник. Средняя за период мощность здесь равна нулю, поскольку в цепи с конденсатором активная мощность не потребляется, а происходит обмен электрической энергией между конденсатором и источником. Следовательно, конденсатор так же, как и индуктивность, является реактивным сопротивлением.

4.8. Цепь переменного тока с емкостью и активным сопротивлением

В реальных цепях переменного тока с емкостью всегда имеется активное сопротивление – сопротив-

ление проводов, активные потери в конденсаторе и т.д. Поэтому реальную цепь с емкостью следует рассматривать состоящей из последовательно соединенных активного сопротивления R и конденсатора C (рис. 4.14):

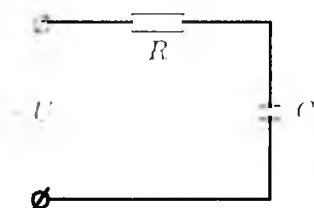


Рис. 4.14

Через конденсатор и через резистор протекает один и тот же ток, описываемый формулой (4.16), поэтому в качестве основного выберем вектор тока и будем строить вектор напряжения, приложенного к этой цепи. Напряжение, приложенное к цепи, равно векторной сумме падений напряжений на конденсаторе и на резисторе:

$$U = U_c + U_R \quad (4.28)$$

Напряжение на резисторе, как было показано выше, будет совпадать по фазе с током:

$$U_R = U_{oR} \sin \omega t, \quad (4.29)$$

а напряжение на конденсаторе будет отставать по фазе от тока на угол $\pi/2$:

$$U_c = U_{oc} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right). \quad (4.30)$$

Построив векторы I , U_R и U_c и воспользовавшись формулой (4.28), найдем вектор U . Векторная диаграмма показана на рис. 4.15.

Из векторной диаграммы следует, что в рассматриваемой цепи ток \vec{I} опережает по фазе приложенное напряжение \vec{U} , но не на $\pi/2$, как в случае чистой емкости, а на некоторый угол φ . Этот угол может принимать значения от 0 до $\pi/2$ и при заданной емкости C зависит от значения активного сопротивления: с увеличением R угол φ уменьшается.

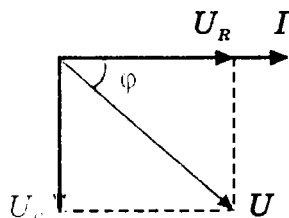


Рис. 4.15

Как видно из векторной диаграммы, модуль вектора \vec{U} равен

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2} = I \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} = IZ_1, \quad (4.31)$$

где величина

$$Z_1 = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (4.32)$$

называется полным сопротивлением цепи.

Сдвиг по фазе φ между током и напряжением в данной цепи определяется из векторной диаграммы:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_C}{U_R} = \frac{1/\omega C}{R} = \frac{1}{\omega CR}. \quad (4.33)$$

4.9. Последовательная цепь переменного тока.

Резонанс напряжений

Рассмотрим теперь цепь переменного тока, содержащую индуктивность, емкость и резистор, включенные последовательно (рис. 4.16).

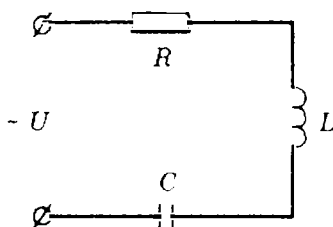


Рис. 4.16

Через все элементы цепи протекает один и тот же ток, поэтому в качестве основного выберем вектор тока и будем строить вектор напряжения, приложенного к этой цепи. Напряжение, приложенное к цепи, равно векторной сумме падений напряжений на катушке индуктивности, на емкости и на резисторе:

$$\vec{U} = \vec{U}_L + \vec{U}_C + \vec{U}_R. \quad (4.34)$$

Мы уже знаем, что напряжение на резисторе совпадает по фазе с током, напряжение на катушке опережает ток по фазе на $\pi/2$, а напряжение на емкости отстает от тока по фазе на $\pi/2$. Можно записать эти напряжения в следующем виде:

$$U_R = U_{oR} \sin \omega t = I_0 R \sin \omega t;$$

$$U_L = U_{oL} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = I_0 \omega L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right); \quad (4.35)$$

$$U_C = U_{oC} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{I_0}{\omega C} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Поскольку нам известны амплитуды и фазы этих векторов, мы можем построить векторную диаграмму и найти вектор U (рис. 4.17).

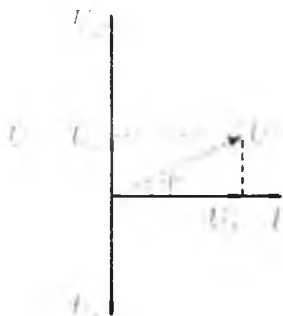


Рис. 4.17

Из этой векторной диаграммы мы можем найти модуль вектора приложенного к цепи напряжения U и сдвиг по фазе φ между током и напряжением:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = IZ, \quad (4.36)$$

где величина

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (4.37)$$

называется *полным сопротивлением* цепи.

Из векторной диаграммы видно, что сдвиг по фазе между током и напряжением определяется уравнением

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_R} = \frac{\omega L}{R} - \frac{1}{\omega C} \quad (4.38)$$

В результате построения диаграммы мы получили треугольник напряжений, гипотенуза которого равна приложенному напряжению U . При этом разность

фаз между током и напряжением определяется соотношением векторов \vec{U}_L , \vec{U}_C и \vec{U}_R . При $U_L > U_C$ (см. рис. 4.17) угол φ положителен и нагрузка имеет индуктивный характер. При $U_L < U_C$ угол φ отрицателен и нагрузка имеет емкостной характер (рис. 4.18, а). А при $U_L = U_C$ угол φ равен нулю и нагрузка является чисто активной (рис. 4.18, б).

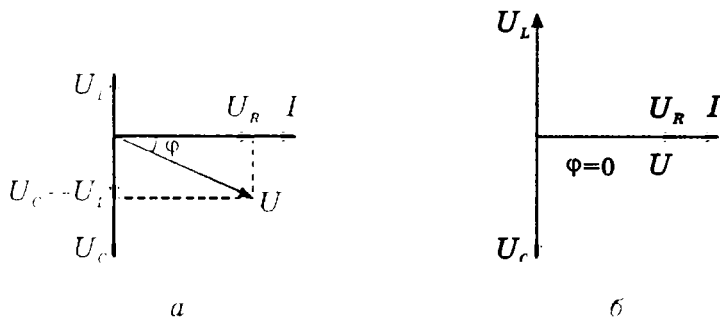


Рис. 4.18

Разделив стороны треугольника напряжений (рис. 4.17) на значение тока в цепи, получим треугольник сопротивлений (рис. 4.19), в котором R – активное сопротивление, Z – полное сопротивление, а $x = x_L - x_C$ – реактивное сопротивление.

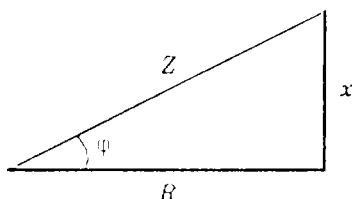


Рис. 4.19

Кроме того,

$$R = Z \cos \varphi; \quad x = Z \sin \varphi. \quad (4.39)$$

Когда напряжения на индуктивности и емкости U_L и U_C , взаимно сдвинутые по фазе на 180° , равны по величине, то они полностью компенсируют друг друга (рис. 4.18, б). Напряжение, приложенное к цепи, равно напряжению на активном сопротивлении, а ток в цепи совпадает по фазе с напряжением. Этот случай называется *резонансом напряжений*.

Итак, условием резонанса напряжений является равенство напряжений на индуктивности и емкости или равенство индуктивного и емкостного сопротивлений цепи:

$$x_L = x_C \quad \text{или} \quad \omega L = \frac{1}{\omega C}. \quad (4.40)$$

При резонансе напряжений ток в цепи, согласно (4.36), равен:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + 0}} = \frac{U}{R}, \quad (4.41)$$

т. е. цепь в данном случае имеет наименьшее возможное сопротивление, как будто в нее включено только активное сопротивление R . Ток в цепи при этом достигает максимального значения, угол сдвига фаз между током и напряжением φ равен нулю, а $\cos \varphi = 1$.

Резонанс напряжений характеризуется обменом энергии между магнитным полем катушки и электрическим полем конденсатора.

Увеличение магнитного поля катушки индуктивности происходит исключительно за счет уменьшения энергии электрического поля в конденсаторе, и наоборот.

Следует обратить внимание на то, что при резонансе напряжения на реактивных сопротивлениях x_L и x_C могут заметно превышать приложенное к цепи напряжение. Если мы возьмем отношение при-

ложенного напряжения к напряжению на индуктивности (или емкости), то получим

$$\frac{U}{U_L} = \frac{IZ}{Ix_L} = \frac{Z}{x_L} \quad \text{или} \quad U_L = U \frac{x_L}{R}, \quad (4.42)$$

то есть напряжение на индуктивности будет больше приложенного напряжения в $\frac{x_L}{R}$ раз. Это означает, что при резонансе напряжений на отдельных участках цепи могут возникать напряжения, опасные для изоляции приборов, включенных в данную цепь. В радиотехнике явление резонанса напряжений находит широкое применение в приемно-передающей аппаратуре и радиоизмерительных приборах.

4.10. Параллельная цепь переменного тока.

Резонанс токов

В отличие от последовательных цепей переменного тока, где ток, протекающий по всем элементам цепи, одинаков, в параллельных цепях одинаковым будет напряжение, приложенное к параллельно включенным ветвям цепи.

Рассмотрим параллельное включение емкости и ветви, состоящей из индуктивности и активного сопротивления (рис. 4.20).

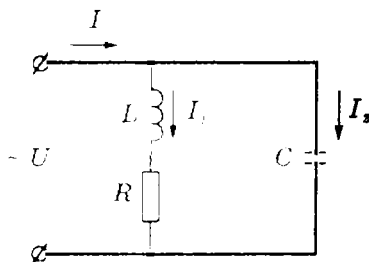


Рис. 4.20

Обе ветви находятся под одним и тем же приложенным напряжением U . Построим векторную диаграмму для этой цепи. В качестве основного вектора выберем вектор приложенного напряжения U (рис. 4.21).

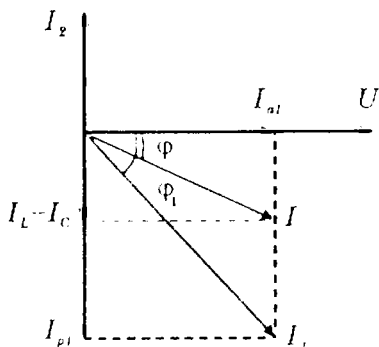


Рис. 4.21

По ветви с индуктивностью и активным сопротивлением течет ток I_1 . Длину этого вектора найдем из соотношения

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + x_L^2}} \quad (4.43)$$

и отложим этот вектор по отношению к вектору \vec{U} под углом φ_1 , который определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{x_L}{R} \quad (4.44)$$

Полученный таким образом вектор тока \vec{I}_1 разложим на две составляющие: активную $I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1$ и реактивную $I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1$ (рис. 4.21).

Величину вектора тока I_2 , текущего по ветви с емкостью, находим из соотношения

$$I_2 = \frac{U}{x_c} = \frac{U}{1/\omega C} = \omega CU \quad (4.45)$$

и откладываем этот вектор под углом 90° против часовой стрелки относительно вектора приложенного напряжения \vec{U} .

Общий ток в цепи \vec{I} равен геометрической сумме токов \vec{I}_1 и \vec{I}_2 или геометрической сумме реактивного тока $I_{p1} = I_2 - I_L = I_c$ и активного тока I_{a1} . Длина вектора \vec{I} равна

$$I = \sqrt{(I_L - I_c)^2 + (I_{a1})^2} \quad (4.46)$$

Сдвиг по фазе между общим током \vec{I} и приложенным напряжением \vec{U} можно определить из соотношения

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_L - I_c}{I_{a1}} \quad (4.47)$$

Из векторной диаграммы (рис. 4.21) видно, что длина и положение вектора общего тока зависят от соотношения между реактивными токами I_L и I_c . В частности, при $I_L > I_c$ общий ток отстает по фазе от приложенного напряжения, при $I_L < I_c$ — опережает его, а при $I_L = I_c$ — совпадает с ним по фазе. Последний случай ($I_L = I_c$) называется *резонансом токов*. При резонансе токов общий ток равен активной составляющей тока в цепи, т. е. происходящие в цепи процессы таковы, как будто в ней содержится только активное сопротивление (в этом случае $\varphi = 0$ и $\cos \varphi = 1$). При резонансе общий ток в цепи принимает минимальное значение и становится чисто активным, тогда как реактивные токи в ветвях не равны нулю и противоположны по фазе.

4.11. Мощность переменного тока

Умножив стороны треугольника напряжений (рис. 4.17) на значение тока в цепи, получим треугольник мощностей (рис. 4.22).

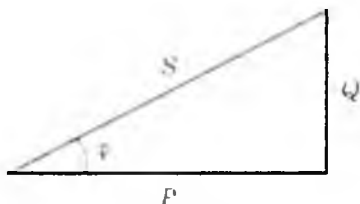


Рис. 4.22

Здесь S – полная мощность, Q – реактивная мощность и P – активная мощность. Из треугольника мощностей следует, что

$$\begin{aligned} S &= IU = \sqrt{P^2 + Q^2}; \\ Q &= S \sin \varphi = IU \sin \varphi; \\ P &= S \cos \varphi = IU \cos \varphi. \end{aligned} \quad (4.48)$$

Реактивная мощность Q всегда связана с обменом электрической энергией между источником и потребителем. Ее измеряют в *вольт-амперах реактивных* (вар).

Полная мощность S содержит в себе как активную, так и реактивную составляющие – это мощность, которая потребляется от источника электроэнергии. При $P = 0$ вся полная мощность становится реактивной, а при $Q = 0$ – активной. Следовательно, составляющие полной мощности определяются характером нагрузки. Полная мощность измеряется в *вольт-амперах* (ВА). Эта величина указывается на табличках приборов переменного тока.

Активная мощность P связана с той электрической энергией, которая может быть преобразована в другие виды энергии – теплоту, механическую работу и т.д. Она измеряется в *ваттах* (Вт). Активная мощность зависит от тока, напряжения и $\cos\varphi$. При увеличении угла φ уменьшаются $\cos\varphi$ и мощность P , а при уменьшении угла φ активная мощность P возрастает. Таким образом, $\cos\varphi$ показывает, какая часть полной мощности теоретически может быть преобразована в другие виды энергии. Величина $\cos\varphi$ называется *коэффициентом мощности*.

Для более рационального использования мощности переменного тока, вырабатываемого источниками электрической энергии, надо стараться сделать нагрузку такой, чтобы $\cos\varphi$ в цепи был близок к единице. На практике, в масштабах предприятия добиться этого довольно трудно, и хорошим показателем является $\cos\varphi = 0,9-0,95$.

При низких значениях $\cos\varphi$ возникают дополнительные потери на нагревание проводов.

Для увеличения $\cos\varphi$ на практике часто используют резонанс токов и резонанс напряжений. Если в цепь с индуктивностью последовательно включить емкость и подобрать ее так, чтобы реактивное сопротивление емкости равнялось реактивному сопротивлению индуктивности ($x_c = x_l$), то в цепи наступит резонанс напряжений и $\cos\varphi$ станет равен 1. Этот способ называется *последовательной компенсацией*.

Аналогично, если параллельно индуктивной нагрузке подключить конденсатор, подобранный таким образом, что его емкостное сопротивление равно индуктивному сопротивлению нагрузки, то в цепи наступит резонанс токов и $\cos\varphi$ станет равен 1. Этот способ называется *параллельной компенсацией*.

Обычно ограничиваются повышением $\cos\varphi$ до 0,85–0,9; дальнейшее повышение его до 1 незначительно сказывается на уменьшении общего тока и экономически не оправдывается.

Вопросы для повторения

1. Какой ток называется переменным?
2. Что такое мгновенное значение ЭДС, тока и напряжения?
3. Что называется фазой?
4. Что называется амплитудой?
5. Что такое частота?
6. Какова связь между периодом и частотой?
7. Дайте определение действующего значения тока и напряжения.
8. Какое сопротивление называется активным, а какое реактивным?
9. От чего зависит емкостное сопротивление?
10. От чего зависит индуктивное сопротивление?
11. В какой цепи наблюдается резонанс напряжений? Запишите условие резонанса.
12. В какой цепи наблюдается резонанс токов? Запишите условие резонанса.
13. Дайте определение полной, активной и реактивной мощностей.
14. Что такое коэффициент мощности?
15. Как на практике увеличивают коэффициент мощности?

Глава 5. Трехфазный переменный ток

5.1. Принцип построения трехфазной системы

Объединение в одной линии электропередачи нескольких цепей переменного тока с независимыми источниками электроэнергии называется *многофазной* системой. Наибольшее распространение получила *трехфазная* система, которая была изобретена и разработана во всех деталях, включая генератор трехфазного переменного тока, трехфазный трансформатор и асинхронный двигатель, выдающимся русским инженером М. О. Доливо-Добровольским в 1889–1891 гг. Благодаря своим достоинствам, изобретение М. О. Доливо-Добровольского привлекло внимание инженеров и промышленников всего мира; трехфазная система быстро заняла ведущее положение в мировой электротехнике и сохраняет его до наших дней.

Трехфазной системой переменного тока называется совокупность трех однофазных переменных токов одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых друг относительно друга по фазе на $1/3$ периода (120°).

Для того чтобы выяснить, как получают трехфазный переменный ток, кратко рассмотрим уст-

ройство *трехфазного генератора* (более подробно оно будет рассмотрено ниже). Трехфазный генератор состоит из трех одинаковых изолированных друг от друга обмоток, расположенных на статоре и разнесенных в пространстве на 120° . В центре статора вращается электромагнит (рис. 5.1).

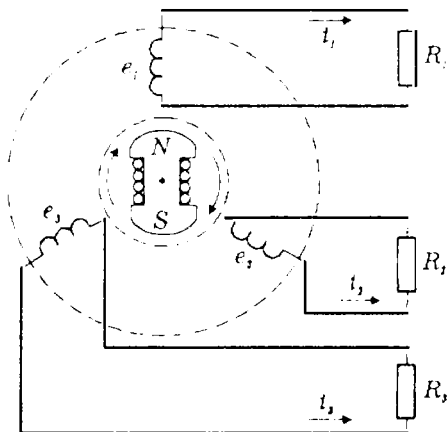


Рис. 5.1

При этом форма магнита такова, что магнитный поток, пронизывающий каждую катушку, изменяется по косинусоидальному закону. Тогда по закону электромагнитной индукции в катушках будут индуцироваться ЭДС равной амплитуды и частоты, отличающиеся друг от друга по фазе на 120° :

$$\begin{aligned} e_1 &= E_0 \sin \omega t; \\ e_2 &= E_0 \sin(\omega t - 120^\circ); \\ e_3 &= E_0 \sin(\omega t - 240^\circ). \end{aligned} \quad (5.1)$$

Эти три ЭДС можно изобразить на временной (рис. 5.2, а) и векторной (рис. 5.2, б) диаграммах:

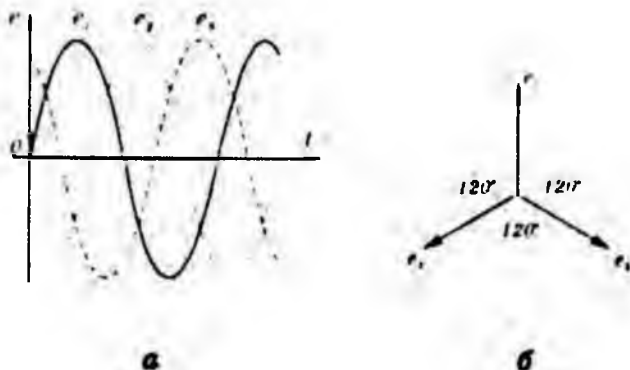


Рис. 5.2

Как видно из векторной диаграммы, сумма этих трех ЭДС равна нулю.

Если в трехфазной системе действуют электродвигающие силы, равные по величине и сдвинутые по фазе на 120° , а полные сопротивления нагрузок всех трех фаз как по величине, так и по характеру (по величине и знаку фазового сдвига) одинаковы, то режим в ней называется *симметричным*. Невыполнение одного из этих условий или обоих вместе является причиной *несимметричного* режима.

Чтобы образовать из этих независимых однофазных систем единую трехфазную систему, необходимо определенным образом электрически соединить отдельные обмотки.

Существуют два основных способа соединения: звездой и треугольником.

5.2. Соединение звездой

Отдельные фазы трехфазной системы принято обозначать латинскими буквами А, В и С. Этими же

буквами обозначают начала обмоток генератора. Концы обмоток обозначают буквами X, Y и Z.

Условимся, что положительно направленный ток выходит из обмотки генератора через ее начало и входит в нее через ее конец (рис. 5.1). Если все концы обмоток генератора соединить в одной точке O , а к их началам присоединить провода, идущие к приемникам электрической энергии (у которых концы также соединены в общей точке O'), то мы получим соединение *звездой* (рис. 5.3).



Рис. 5.3

Мы видим, что контуры, по которым замыкаются фазные токи, при таком соединении не изменятся по сравнению с рис. 5.1. Следовательно, по общему обратному проводу будет протекать ток, равный сумме токов трех фаз:

$$\vec{I}_0 = \vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C. \quad (5.2)$$

Если все три фазы имеют одинаковые нагрузки, то фазные токи будут равны по модулю, отличаясь друг от друга по фазе на 120° :

$$\begin{aligned} I_A &= I_m \sin \omega t; \\ I_B &= I_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\ I_C &= I_m \sin(\omega t - 240^\circ). \end{aligned} \quad (5.3)$$

Для того чтобы найти значение тока в проводе OO' , нужно сложить токи (5.3). Но намного проще это можно сделать с помощью векторной диаграммы (рис. 5.4). В результате мы получим, что при симметричной нагрузке ток в общем проводе равен нулю, поэтому провод OO' называется *нулевым*. Точка соединения концов обмоток генератора или концов нагрузок называется *нулевой*. Провода, соединяющие начала обмоток генератора с приемниками электроэнергии, называются *линейными*. Система трехфазного тока с нулевым проводом называется *четырёхпроводной*.

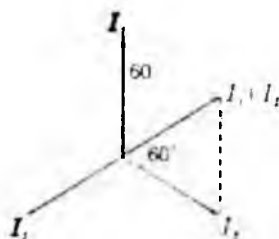


Рис. 5.4

В цепях трехфазного тока вне зависимости от способа соединения различают два типа напряжений – линейные U_L и фазные U_ϕ – и два типа токов – линейные I_L и фазные I_ϕ . Напряжение между двумя линейными проводами называется *линейным*, а между линейным и нулевым проводом – *фазным*. Токи, протекающие в линейных проводах, называются *линейными*, а в нагрузках фаз – *фазными*.

На первый взгляд может показаться, что поскольку в нулевом проводе ток равен нулю, то этот провод можно совсем убрать, оставив только три линейных провода. Однако это не всегда возможно.

В случае несимметричной нагрузки отсутствие нулевого провода приведет к перераспределению фазных напряжений, в результате чего некоторые из них станут выше номинального (что недопустимо), а некоторые – ниже. Если же при несимметричной нагрузке включить нулевой провод, то все фазные напряжения будут равны номинальному, а по нулевому проводу будет протекать некоторый ток. В этом легко убедиться с помощью векторных диаграмм. Следовательно, в цепях с симметричными нагрузками нулевой провод не нужен. Таковыми являются, например, электродвигатели. Однако наличие нулевого провода обеспечивает равенство фазных напряжений при несимметричной нагрузке.

В дальнейшем для обозначения линейных напряжений будем пользоваться двойными индексами, а фазных – одинарными (рис. 5.5).

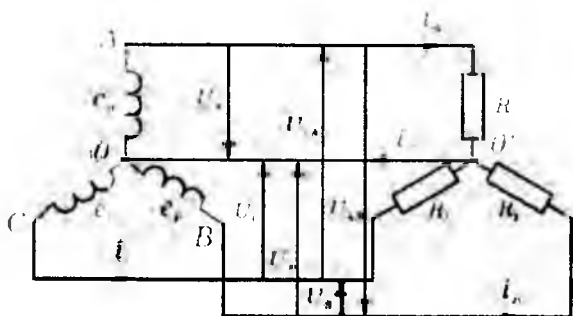


Рис. 5.5

При соединении звездой линейный ток совпадает с фазным, т.е. $I_n = I_\phi$. Как видно из рис. 5.5, линейные напряжения при соединении звездой являются векторными разностями соответствующих фазных напряжений:

$$\begin{aligned}
 \vec{U}_{AB} &= \vec{U}_A - \vec{U}_B; \\
 \vec{U}_{BC} &= \vec{U}_B - \vec{U}_C; \\
 \vec{U}_{CA} &= \vec{U}_C - \vec{U}_A.
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

Построим векторную диаграмму линейных и фазных напряжений при соединении звездой (рис. 5.6).

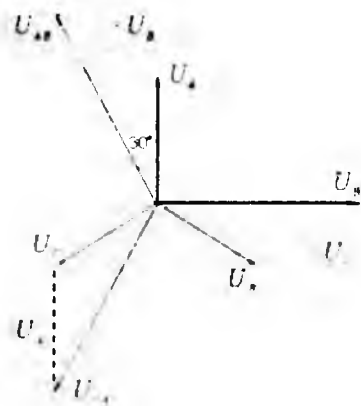


Рис. 5.6

Сначала построим три вектора фазных напряжений: \vec{U}_A , \vec{U}_B и \vec{U}_C , расположенные друг относительно друга под углом 120° , а затем, пользуясь соотношениями (5.4) – векторы линейных напряжений. Для построения вектора линейного напряжения U_{AB} нужно из вектора \vec{U}_A вычесть вектор \vec{U}_B , т. е. прибавить к вектору \vec{U}_A вектор $(-\vec{U}_B)$. Таким же способом строятся и остальные векторы линейных напряжений. Мы видим, что линейные напряжения также образуют симметричную трехлучевую звезду, повернутую относительно звезды фазных напряжений на угол 30° против часовой стрелки.

Для нахождения соотношения между модулями линейных и фазных напряжений рассмотрим тупоугольный треугольник с углом 120° при вершине, образованный векторами U_A , $(-U_B)$ и U_{AB} . Опустим перпендикуляр из вершины тупого угла этого треугольника на противоположную сторону и найдем, что $U_{AB} / 2 = U_A \cos 30^\circ$. Следовательно,

$$U_n = \sqrt{3}U_\phi . \quad (5.5)$$

Таким образом, в трехфазной системе, соединенной звездой, линейные напряжения больше фазных в $\sqrt{3}$ раз. Например, если линейное напряжение равно 220 В , то фазное будет в $\sqrt{3}$ раз меньше и равно 127 В . Если же фазное напряжение равно 220 В , то линейное будет в $\sqrt{3}$ раз больше и равно 380 В . В России и в большинстве других стран напряжения 127 , 220 и 380 В приняты стандартными для приемников низкого напряжения. При соединении звездой с нулевым проводом существуют две системы напряжений — $220/127 \text{ В}$ и $380/220 \text{ В}$. Наличие двух напряжений (линейного и фазного) является достоинством четырехпроводной линии.

Если при соединении звездой с нулевым проводом нагрузка становится неравномерной, то соотношение (5.5) можно считать практически справедливым. Следует только помнить, что в этом случае в нулевом проводе появляется ток. Это приводит к незначительному падению напряжения на нулевом проводе, которым обычно можно пренебречь. Поэтому можно считать, что между нулевой точкой генератора и нулевой точкой приемника разность потенциалов отсутствует.

Соединение звездой без нулевого провода применяют при подключении обмоток трехфазных двига-

телей, а соединение с нулевым проводом – при электрификации жилых домов. В последнем случае он необходим, поскольку в жилом доме практически невозможно добиться симметрии нагрузок. При этом к домам подводят три фазы и нулевой провод, а внутри каждого дома стремятся примерно одинаково загрузить каждую из фаз, чтобы общая нагрузка была более или менее симметричной. К каждой квартире подводят нулевой провод и одну из фаз. Установка предохранителей в нулевом проводе на распределительных щитах категорически запрещена, так как при его перегорании фазные напряжения могут стать неравными, а это приводит к превышению номинального напряжения в некоторых фазах и выходу из строя осветительных и бытовых приборов.

5.3. Соединение треугольником

Если обмотки генератора трехфазного тока соединить так, что конец первой обмотки соединяется с началом второй, конец второй с началом третьей, конец третьей с началом первой, а к общим точкам подключить линейные провода, то получим соединение *треугольником* (рис. 5.7).

Кажущегося короткого замыкания в обмотках генератора не произойдет, так как сумма мгновенных значений ЭДС в них равна нулю:

$$e_{AB} + e_{BC} + e_{CA} = 0, \quad (5.6)$$

в чем легко убедиться, построив векторную диаграмму.

На рис. 5.7 три приемника тока Z_{AB} , Z_{BC} , Z_{CA} также включены треугольником. В отличие от соединения звездой, где в большинстве случаев применяется четырехпроводная система, здесь используются три провода.

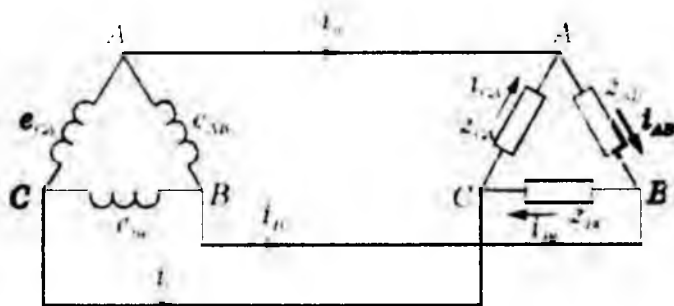


Рис. 5.7

При соединении треугольником существуют только линейные напряжения (U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}), поскольку нулевой провод отсутствует, но появляются фазные (I_{AB}, I_{BC}, I_{CA}) и линейные (I_A, I_B, I_C) токи. Соотношения между линейными и фазными токами легко могут быть получены, если для каждой узловой точки потребителя применить первое правило Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \vec{I}_A &= \vec{I}_{AB} - \vec{I}_{CA}; \\ \vec{I}_B &= \vec{I}_{BC} - \vec{I}_{AB}; \\ \vec{I}_C &= \vec{I}_{CA} - \vec{I}_{BC}. \end{aligned} \quad (5.7)$$

Из этих соотношений видно, что любой из линейных токов равен геометрической разности двух фазных токов. Кроме того, почленное сложение этих равенств показывает, что геометрическая сумма линейных токов равна нулю:

$$\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = 0. \quad (5.8)$$

Для построения векторной диаграммы в качестве исходных возьмем три вектора линейных напряжений (U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}), расположенных под углом 120° друг относительно друга (рис. 5.8).

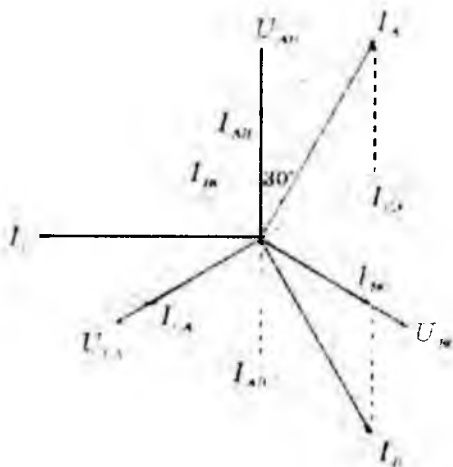


Рис. 5.8

При симметричной нагрузке векторы фазных токов I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} сдвинуты по фазе относительно соответствующих напряжений на угол ϕ , величина которого зависит от характера нагрузки.

Теперь, пользуясь соотношениями (5.7), построим на этой же диаграмме векторы линейных токов. Для того чтобы построить вектор линейного тока \vec{I}_A , нужно к вектору фазного тока \vec{I}_{AB} прибавить вектор $(-\vec{I}_{CA})$, т. е. вектор, равный по длине \vec{I}_{CA} , но противоположный по направлению. Так же строятся остальные векторы линейных токов.

Для нахождения соотношения между модулями линейных и фазных токов рассмотрим тупоугольный треугольник с углом 120° при вершине, образованный векторами \vec{I}_A , $(-\vec{I}_{CA})$ и \vec{I}_{AB} . Опустим перпендикуляр из вершины тупого угла этого треугольника на противоположную сторону и найдем, что $I_A / 2 = I_{AB} \cos 30^\circ$. Следовательно, $I_L = \sqrt{3} I_\phi$.

Таким образом, в трехфазной системе, соединенной треугольником, линейные токи больше фазных в $\sqrt{3}$ раз, а фазные напряжения совпадают с линейными.

Наличие двух способов включения нагрузок расширяет возможности потребителей. Например, если каждая из трех обмоток трехфазного электродвигателя рассчитана на напряжение 220 В, то электродвигатель может быть включен треугольником в сеть 220/127 В или звездой в сеть 380/220 В. Соединение треугольником чаще всего используется в силовых установках (электродвигатели и т. п.), где нагрузка близка к равномерной. В трехфазных цепях способ включения нагрузки (звездой или треугольником) не зависит от способа включения обмоток генератора или трансформатора, питающего данную цепь.

5.4. Мощность трехфазной системы

и методы ее измерения

Активной мощностью трехфазной системы называют сумму активных мощностей ее отдельных фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C = I_{\phi A} U_{\phi A} \cos \varphi_A + I_{\phi B} U_{\phi B} \cos \varphi_B + I_{\phi C} U_{\phi C} \cos \varphi_C. \quad (5.9)$$

При симметричной нагрузке мощности отдельных фаз равны между собой, а общая мощность определяется как

$$P = 3 I_{\phi} U_{\phi} \cos \varphi. \quad (5.10)$$

На практике мощность трехфазной системы чаще выражают через линейные, а не через фазные токи и напряжения. При соединении звездой $U_{\phi} = U_{\ell} / \sqrt{3}$ и $I_{\phi} = I_{\ell}$, а при соединении треугольником $U_{\phi} = U_{\ell}$ и $I_{\phi} = I_{\ell} / \sqrt{3}$. В обоих случаях, заменяя фазные

величины линейными, мы получим одно и то же выражение для мощности трехфазной системы при симметричной нагрузке:

$$P = 3I_{\phi} U_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3} I_n U_n \cos \varphi. \quad (5.11)$$

Для трехфазной системы также справедливы следующие соотношения для полной, активной и реактивной мощностей, соответственно:

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{3} U_n I_n; \\ P &= \sqrt{3} U_n I_n \cos \varphi; \\ Q &= \sqrt{3} U_n I_n \sin \varphi. \end{aligned} \quad (5.12)$$

Существуют несколько методов измерения мощности трехфазной системы, у каждого из них своя область применения. Для измерения мощности используются в основном однофазные ваттметры электродинамической системы, которые подробно описаны в гл. 6. Однофазный *ваттметр* (рис. 5.9) содержит две обмотки – токовую (обозначена более жирной линией), которая включается последовательно с объектом измерения (как амперметр), и обмотку напряжения, включающую параллельно (как вольтметр).

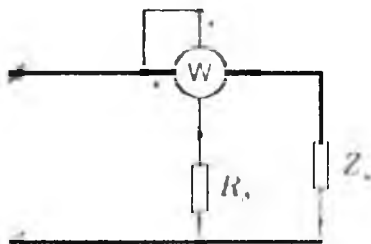


Рис. 5.9

Сначала рассмотрим измерение активной мощности. Для измерения активной мощности применяют четыре способа:

1. **Способ одного ваттметра** используют для измерения мощности при симметричной нагрузке, соединенной звездой с доступной нулевой точкой (рис. 5.10).

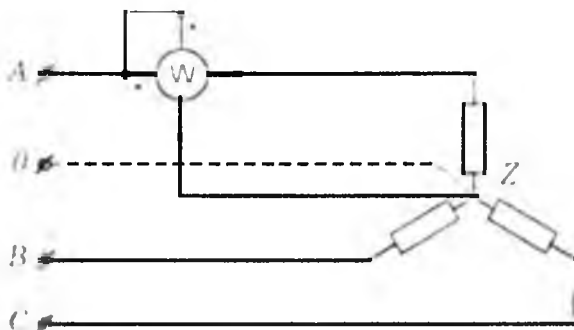


Рис. 5.10

При этом токовая цепь ваттметра включается последовательно с одной из фаз нагрузки, а цепь напряжения прибора - на напряжение этой же фазы. В этом случае общая мощность трехфазной системы равна утроенному показанию ваттметра:

$$P = 3 I_n U_n \cos \varphi . \quad (5.13)$$

2. **Способ одного ваттметра с созданием искусственной нулевой точки** применяют тогда, когда нагрузка симметрична, а нулевая точка нагрузки недоступна или вообще отсутствует (например, при соединении треугольником). Токовая обмотка ваттметра включается последовательно в одну из фаз нагрузки, а нулевую точку создают путем включения двух одинаковых добавочных сопротивлений R_0 между двумя другими фазами (рис. 5.11).

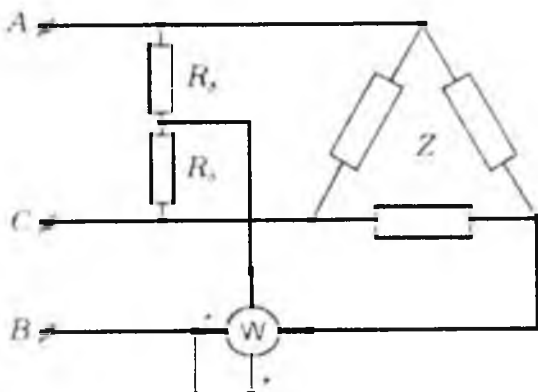


Рис. 5.11

Величина добавочных сопротивлений должна быть равна сопротивлению обмотки напряжения ваттметра. Тогда искусственная нулевая точка является нулевой точкой звезды, состоящей из сопротивления обмотки напряжения ваттметра и двух добавочных сопротивлений, и цепь напряжения ваттметра находится под фазным напряжением, а через токовую цепь проходит фазный ток. В этом случае общая мощность трехфазной системы равна утроенному показанию ваттметра.

3. Способ трех ваттметров применяют для измерения мощности при неравномерной нагрузке, соединенной звездой. В каждый из линейных проводов включается токовая цепь одного из ваттметров, а их цепи напряжения включаются между соответствующим линейным проводом и нулевым проводом системы (рис. 5.12).

При таком соединении каждый из ваттметров измеряет мощность одной фазы системы. Активная мощность всей трехфазной системы равна сумме показаний трех ваттметров.

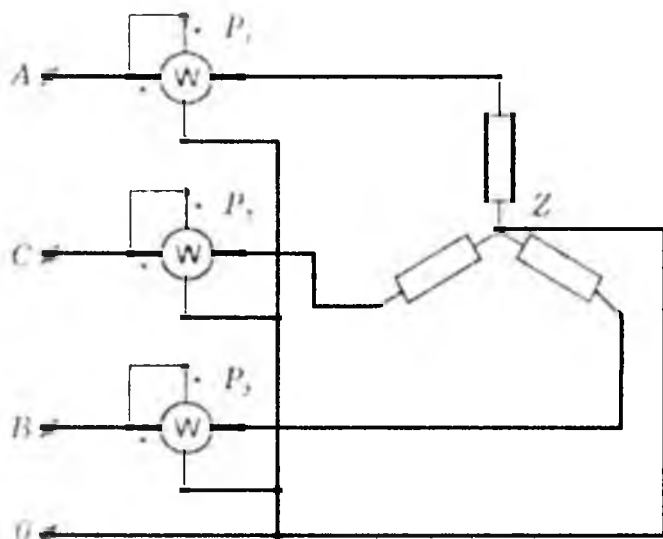


Рис. 5.12

4. Способ двух ваттметров. Этот способ универсален – он применяется при симметричной и несимметричной нагрузках и при любом типе соединения. Нулевой провод может быть, а может и отсутствовать – он просто не используется. Токовые обмотки ваттметров включают в какие-нибудь две фазы, а обмотки напряжения между третьей (незанятой) фазой и той фазой, в которую включена токовая обмотка данного ваттметра (рис. 5.13).

В этом случае общая мощность трехфазной системы равна алгебраической сумме показаний двух ваттметров. Докажем это для случая соединения треугольником.

Общая мгновенная мощность трехфазной цепи при соединении треугольником равна сумме мгновенных мощностей отдельных фаз:

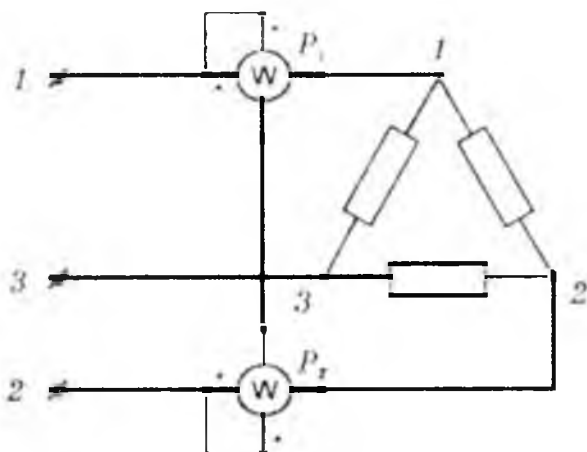


Рис. 5.18

$$P = P_{12} + P_{23} + P_{31} = i_{12} u_{12} + i_{23} u_{23} + i_{31} u_{31}. \quad (5.14)$$

Сумма мгновенных значений линейных напряжений (при соединении как треугольником, так и звездой) равна нулю:

$$u_{12} + u_{23} + u_{31} = 0. \quad (5.15)$$

Из уравнения (5.15) можно выразить мгновенные значения линейных напряжений:

$$\begin{aligned} u_{12} &= -u_{23} - u_{31}, \\ u_{23} &= -u_{12} - u_{31}, \\ u_{31} &= -u_{12} - u_{23}. \end{aligned} \quad (5.16)$$

Подставив первое из них в (5.14), получим:

$$\begin{aligned} P &= i_{12}(-u_{23} - u_{31}) + i_{23}u_{23} + i_{31}u_{31} = \\ &= u_{31}(i_{31} - i_{12}) + u_{23}(i_{23} - i_{12}). \end{aligned} \quad (5.17)$$

Поскольку $i_{12} - i_{31} = i_1$, $i_{23} - i_{12} = i_2$ и $u_{31} = -u_{13}$, то

$$P = u_{13}i_1 + u_{23}i_2. \quad (5.18)$$

Таким образом, мощность трехфазной цепи можно измерить двумя ваттметрами, включив их описанным выше способом.

Вопросы для повторения

1. Дайте определение трехфазной системы переменного тока.
2. Какое соединение называется соединением звездой?
3. Как строится векторная диаграмма для токов и напряжений при соединении звездой?
4. Какое соединение называется соединением треугольником?
5. Как строится векторная диаграмма для токов и напряжений при соединении треугольником?
6. В каком случае отсутствует ток в нулевом проводе?
7. Какова связь между линейными и фазными напряжениями при соединении звездой?
8. Какова связь между линейными и фазными токами при соединении треугольником?
9. Какие способы измерения мощности трехфазной системы вы знаете? В каких случаях применяется каждый из них?

Глава 6. Электрические измерения и приборы

6.1. Классификация измерительных приборов и погрешности измерений

Для контроля режима электрических цепей приходится измерять ряд физических величин: ток, напряжение, мощность, энергию. В цепях переменного тока помимо этого измеряют также частоту, сдвиг по фазе и контролируют форму кривой напряжения и тока.

Измерение – это нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Технические средства, которые служат для измерения электрических величин, называются *электроизмерительными приборами*. Во многих отраслях техники электроизмерительными приборами пользуются также для измерения и контроля неэлектрических величин.

От измерительных приборов, применяемых в электрических цепях, прежде всего требуется, чтобы они не вносили заметных искажений в режим цепи. Поэтому электроизмерительные приборы должны потреблять минимальную мощность и не оказывать существенного влияния на сопротивление цепи.

Приборы, показания которых являются непрерывными функциями измеряемых величин, называют *аналоговыми* (в них отсчет значения измеряемой величины производится по шкале). Измерительные приборы, автоматически вырабатывающие дискретные сигналы измерительной информации и дающие показания в цифровой форме, называют *цифровыми*.

На практике часто применяют суммирующие приборы, в которых значения измеряемой величины суммируются по времени или по другой независимой переменной, например счетчик электрической энергии. Суммирующие измерительные приборы дают значения суммы двух или нескольких величин, подводимых по различным каналам, например ваттметр, суммирующий мощность нескольких электрических генераторов.

Полученное из опыта значение измеряемой величины может отличаться от ее действительного значения. Это может быть обусловлено конструктивными недостатками прибора, несовершенством технологии его изготовления, а также влиянием различных внешних факторов. Разность между показанием прибора X и истинным значением измеряемой величины X_0 называется *абсолютной погрешностью* измерительного прибора:

$$\Delta = X - X_0. \quad (6.1)$$

Относительная погрешность измерения δ определяется обычно в процентах к истинному значению X_0 , но так как отклонения X от X_0 сравнительно малы, то можно считать, что

$$\delta = \frac{\Delta}{X_0} \cdot 100\% \approx \frac{\Delta}{X} \cdot 100\%. \quad (6.2)$$

Поскольку величина X при измерении может принимать любые значения в пределах от 0 до X_N , где

X_N – верхний предел диапазона измерения прибора (номинальное значение), то оценить качество прибора по значению абсолютной или относительной погрешности невозможно. Поэтому было введено понятие *приведенной погрешности*

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_N} \cdot 100\% \quad (6.3)$$

Значение приведенной погрешности, выраженное в процентах: $\gamma = \frac{\Delta}{X_N} \cdot 100\%$, определяет *класс точности прибора*.

По степени точности даваемых показаний электроизмерительные приборы делятся на классы, обозначаемые соответственно числами: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 и 4,0, определяющими максимальную погрешность прибора в процентах при полном отклонении указателя.

Электроизмерительные приборы классифицируют по целому ряду признаков. Здесь приведены лишь некоторые из них:

1. По виду измеряемой величины. Классификация в этом случае производится по наименованию единицы измеряемой величины. На шкале прибора пишут полное его наименование или начальную латинскую букву единицы измеряемой величины, например: амперметр – А, вольтметр – V, ваттметр – W и т. д. К условной букве наименования прибора может быть добавлено обозначение кратности основной единицы: миллиампер – mA, киловольт – kV, мегаватт – MW и т. д.

2. По физическому принципу действия измерительного механизма прибора, т. е. по способу преобразования электрической энергии в механическое действие подвижной части прибора (табл. 6.1).

3. По роду измеряемого тока. Эта классификация позволяет определить, в цепях какого тока можно применять данный прибор (табл. 6.2).





На приборах переменного тока указывают номинальное значение частоты, или диапазон частот, на которые они рассчитаны, например, 120 Гц; 45–550 Гц. Если на приборе не указан диапазон рабочих частот, значит он предназначен для работы в установках с частотой 50 Гц.

4. По классу точности. Класс точности прибора является его обобщенной характеристикой. Допускаемая относительная погрешность меньше в точках шкалы, ближайших к номинальному значению.





На шкале электроизмерительного прибора отмечают: измеряемая им физическая величина, класс точности прибора, род тока, для которого прибор предназначен, рабочее положение (вертикальное или горизонтальное), величина напряжения, при котором испытывалась изоляция прибора, система прибора.

Условные обозначения, указывающие принцип действия измерительного механизма прибора

Таблица 6.1






Тип прибора	Условное обозначение
Магнитоэлектрический с подвижной рамкой	
Магнитоэлектрический логометр с подвижными рамками	
Магнитоэлектрический с подвижным магнитом	
Электромагнитный	

Окончание таблицы 6.1

Тип прибора	Условное обозначение
Электромагнитный логометр	
Электродинамический	
Электродинамический логометр	
Ферродинамический	
Ферродинамический логометр	
Индукционный	
Электростатический	
Вибрационный (язычковый)	
Термоэлектрический	
Термоэлектрический с магнитоэлектрическим измерительным механизмом	
Выпрямительный с магнитоэлектрическим измерительным механизмом	

**Условные обозначения, указывающие род тока,
для которого предназначен прибор**

Таблица 6.2

Род тока	Условное обозначение
Постоянный	
Переменный (однофазная система)	
Постоянный и переменный	
Трехфазная система (общее обозначение)	
Трехфазная система (при несимметричной нагрузке фаз)	

6.2. Устройство электроизмерительных приборов

Согласно ГОСТу, электроизмерительные приборы должны удовлетворять следующим требованиям:

- погрешность прибора не должна превышать его класс точности и изменяться в процессе эксплуатации;

- на показания прибора не должны влиять внешние поля и изменения температуры;

- шкала или ее рабочая часть должна быть по возможности равномерной и проградуирована в практических единицах;

– прибор должен иметь хорошую успокоительную систему, чтобы колебания стрелки прибора быстро прекращались;

– прибор должен быть стойким к перегрузкам и иметь хорошую изоляцию.

Подвижная часть измерительного механизма прибора всегда располагается вертикально или горизонтально и укрепляется или на оси, или на растяжках, или на подвесе. В приборах, подвижная часть которых закреплена на оси, важную роль играют опорные подпятники, в которые для уменьшения трения впрессовывают либо опорные камни (обычно агат, корунд), либо бронзу (в приборах классов 1,5; 2,5 и 4,0).

Ось прибора обычно изготавливают из стали-серебрянки, немагнитной или нержавеющей стали. Наконечник оси конический. В некоторых конструкциях в торцовую часть оси запрессовывают керн из специальных твердых сплавов.

Противодействующий момент в большинстве приборов создается упругой спиральной пружиной. Пружину изготавливают из немагнитных сплавов, например бронзы. Одним концом она крепится к оси подвижной части прибора, а другим – к одной из деталей корпуса. Пружина создает момент, направленный противоположно вращающему моменту, под действием которого поворачивается ось подвижной части.

Для установки стрелки на нулевую отметку шкалы при отключенном состоянии прибора используется корректор – специальный цилиндр, при повороте которого происходит закручивание или ослабление спиральной пружины, а следовательно, перемещение стрелки. В большинстве приборов стрелка при выводе из равновесия подвижной части измерительного механизма должна достигать установленного положения не более чем через 4 с. Для

этого устанавливают успокоители, чаще всего магнитоиндукционного или воздушного типа. Магнитоиндукционные успокоители представляют собой группу неподвижных цилиндрических магнитов. На оси подвижной части прибора закрепляют алюминиевую пластинку. При повороте оси пластинка пересекает магнитный поток, и в ней индуцируется ЭДС, пропорциональная угловой скорости вращения оси. Из-за этого в пластинке возникает ток, который взаимодействует с магнитным потоком, вследствие чего возникает момент, всегда направленный противоположно направлению вращения оси. Воздушный успокоитель представляет собой цилиндр, запаянный с одного конца. Внутри цилиндра находится поршень, жестко связанный с подвижной частью прибора. Зазор между поршнем и цилиндром невелик, и при быстрых перемещениях поршня давление внутри цилиндра не успевает выровняться с атмосферным. Это препятствует движению поршня, и колебания подвижной системы быстро затухают.

Для того чтобы центр тяжести подвижной части прибора совпадал с осью вращения, на специальных держателях, жестко связанных со стрелкой и осью, устанавливают противовесы — грузики с внутренней нарезкой. Изменение положения центра тяжести подвижной системы производится перемещением противовесов по нарезной части держателей.

И, наконец, основные технические и эксплуатационные характеристики прибора указывают, как обычно, условными знаками на лицевой стороне прибора. Если их невозможно разместить на шкале, они выносятся на табличку, устанавливаемую на крышке прибора или на боковых поверхностях корпуса.

6.3. Приборы магнитоэлектрической системы

Принцип действия приборов магнитоэлектрической системы основан на взаимодействии рамки с током I с магнитным полем постоянного магнита M (рис. 6.1).

Полюсные наконечники служат для создания однородного магнитного поля, в котором может поворачиваться легкий стальной цилиндр 2 вместе с легкой алюминиевой рамкой, которая содержит обмотку. Измеряемый ток проходит в рамку через спиральные пружины 1 , которые одновременно служат для создания противодействующего момента.

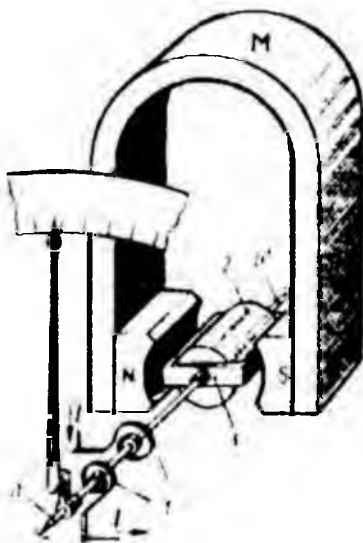


Рис. 6.1

При протекании тока через рамку возникают силы, создающие вращательный момент, который

по мере ее поворота уравновешивается механическим противодействующим моментом, создаваемым пружинами.

Если по обмотке с числом витков w протекает ток I , то создается вращающий момент

$$M_{\text{в}} = BwIS, \quad (6.4)$$

где B — магнитная индукция в зазоре, в котором вращается рамка, S — площадь рамки. Так как величины B, w и S для данного прибора постоянные, то их произведение дает также постоянную величину. Следовательно, можно записать: $M_{\text{в}} = k_1 I$. Под действием этого вращающего момента рамка поворачивается на угол α и закручивает спиральную пружину, которая создает противодействующий момент

$$M_{\text{п}} = k_2 \alpha, \quad (6.5)$$

где k_2 — постоянная, характеризующая жесткость пружины.

При некотором угле поворота рамки противодействующий момент пружины будет равен вращающему моменту, т.е. $k_1 I = k_2 \alpha$. Обозначив $k = \frac{k_2}{k_1}$,

$$\text{получим } \alpha = kI, \quad (6.6)$$

где k — постоянная данного прибора по току, которая называется чувствительностью прибора. Таким образом, угол поворота стрелки магнитоэлектрического прибора пропорционален току в рамке и шкала такого прибора равномерна.

Механизм магнитоэлектрического прибора обычно используется для изготовления гальванометра и амперметра. Но ток, проходя по обмотке рамки, создает на ней падение напряжения $U = IR$, равное напряжению, приложенному к прибору, и угол

поворота стрелки будет пропорционален этому на-

пряжению: $\alpha = kI = k \frac{U}{R} = cU$, где $c = \frac{k}{R}$ — посто-

янная прибора по напряжению. Отсюда следует, что магнитоэлектрический механизм можно использовать и для изготовления вольтметра. Так как сопротивление вольтметра должно быть достаточно большим, то в вольтметре магнитоэлектрической системы последовательно с обмоткой рамки включают добавочный резистор с большим сопротивлением. Меняя величину добавочного резистора, можно уменьшать или увеличивать предел измерения напряжения.

Если магнитоэлектрический прибор используют для измерения сравнительно больших токов, то параллельно рамке присоединяют резистор, называемый шунтом (см. раздел 2.7). В этом случае через измерительный прибор идет только часть измеряемого тока, и предел измерения по току расширяется.

Магнитоэлектрические приборы пригодны только для измерения в цепях постоянного тока. При включении их в цепь переменного тока применяют преобразовательные устройства (выпрямители, термоэлектрические преобразователи и т. д.).

Магнитоэлектрические приборы обладают высокой точностью и чувствительностью, равномерной шкалой, низкой восприимчивостью к изменениям температуры окружающей среды и внешним магнитным полям, малым потреблением энергии. Недостатком таких приборов является пригодность только для постоянных токов (для переменных токов нужны дополнительные устройства), большая чувствительность к перегрузкам, сложность конструкции и высокая стоимость.

6.4. Приборы электромагнитной системы

Принцип действия приборов электромагнитной системы основан на взаимодействии магнитного поля катушки, создаваемого измеряемым током, со стальным сердечником, помещенным в это поле (рис. 6.2).



Рис. 6.2

При протекании измеряемого тока через катушку 1 в ее плоской щели 2 создается магнитное поле. Вне катушки на агатовых подпятниках установлена ось 3 с эксцентрично укрепленным сердечником 4 из магнитомягкой (с малой коэрцитивной силой и большой магнитной проницаемостью) стали и стрелкой 5. Магнитное поле катушки намагничивает сердечник и втягивает его внутрь, поворачивая тем самым ось со стрелкой прибора. Этому повороту препятствует закручивающаяся спиральная пружина 6, создающая противодействующий момент.

В отличие от приборов магнитоэлектрической системы у приборов электромагнитной системы угол отклонения стрелки пропорционален квадрату тока:

$$\alpha = cI^2, \quad (6.7)$$

где c — постоянная для данного прибора величина, поэтому шкала электромагнитного прибора неравномерна. Меняя форму сердечника и его расположение в катушке, можно получить почти равномерную шкалу, начиная с 20% от верхнего предела измерений. При меньших значениях измеряемой величины электромагнитные приборы недостаточно чувствительны и начальная часть шкалы считается нерабочей.

Направление отклонения стрелки прибора не зависит от направления тока в катушке, так как при изменении направления тока одновременно изменяется направление вектора магнитной индукции внутри катушки и в сердечнике, а характер их взаимодействия (притяжение) остается прежним. Этот же вывод следует из выражения (6.7), в которое значение тока входит в квадрате. Следовательно, эти приборы пригодны для измерений в цепях и постоянного, и переменного тока. В цепи переменного тока они измеряют действующее значение. Электромагнитные приборы применяются и как амперметры, и как вольтметры. В последнем случае обмотка выполняется большим числом витков тонкой медной проволоки.

Внешние магнитные поля оказывают значительное влияние на показания электромагнитных приборов из-за относительно слабого собственного магнитного поля. Для ослабления этого влияния измерительный механизм защищают стальным экраном или применяют астатические измерительные механизмы.

Астатическое устройство — это совокупность двух измерительных механизмов, подвижные системы которых объединены в одном приборе и воздействуют на одну и ту же ось со стрелкой. При этом измерительные механизмы расположены так,

что под действием внешнего поля вращающий момент одного из них увеличивается, а другого на столько же уменьшается, при этом общий вращательный момент, действующий на всю подвижную систему прибора, остается неизменным.

Достоинствами электромагнитных приборов являются простота конструкции, невысокая стоимость, пригодность для постоянного и переменного тока, способность выдерживать большие перегрузки, возможность непосредственного включения амперметров на большие токи, а также пригодность их для применения в качестве щитовых приборов. Их недостатки: неравномерность шкалы, низкая чувствительность, сравнительно большое собственное потребление энергии, высокая чувствительность к влиянию внешних магнитных полей.

6.5. Приборы электродинамической и ферродинамической систем

Принцип действия приборов электродинамической системы основан на механическом взаимодействии двух катушек с током (рис. 6.3). Неподвижная катушка 1 состоит из двух секций (для создания однородного поля) и навивается обычно толстой проволокой. Внутри неподвижной помещается легкая подвижная катушка 2, жестко скрепленная с осью и стрелкой. Подвижная катушка включается в измеряемую цепь через спиральные пружины, создающие противодействующий момент. Прибор также содержит воздушный успокоитель 3.

При прохождении тока по катушкам создаются два магнитных поля. Они стремятся повернуть подвижную катушку в положение, в котором энергия всего механизма была бы минимальной.

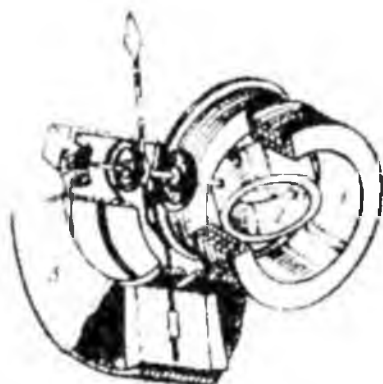


Рис. 6.3

Угол отклонения стрелки прибора электродинамической системы пропорционален произведению токов в катушках:

$$\alpha = kI_1I_2, \quad (6.8)$$

где k – постоянная данного прибора.

Электродинамические приборы можно использовать и для переменного тока, так как направления токов в обеих катушках изменяются на противоположные одновременно (или с постоянным сдвигом по фазе), и поэтому направление поворота подвижной катушки остается неизменным.

Электродинамические приборы используются как вольтметры, как амперметры и главным образом как ваттметры.

При использовании электродинамического прибора в качестве амперметра обмотки обеих катушек соединяют параллельно (рис. 6.4, а) Условно обмотка неподвижной катушки показана толстой линией, обмотка подвижной катушки – тонкой линией.

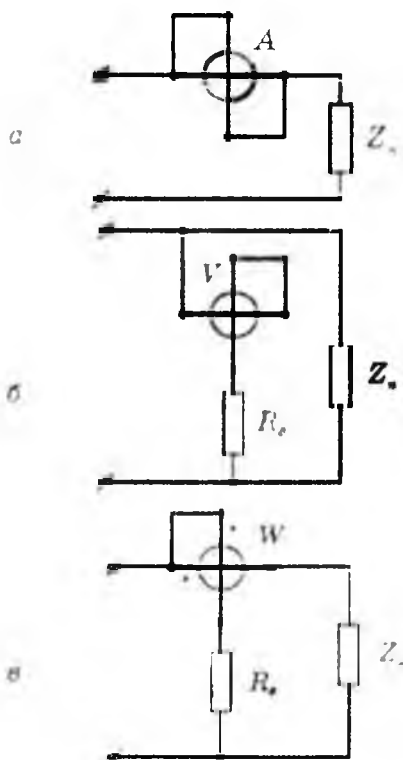


Рис. 6.4

При использовании электродинамического прибора в качестве вольтметра обе обмотки прибора включают последовательно друг с другом и с добавочным резистором R_c (рис. 6.4, б). У вольтметров и амперметров соединение концов обмоток обычно делают внутри прибора, а на его зажимы выведены два конца, подключаемые в цепь.

Шкалы электродинамических вольтметров и амперметров неравномерны, так как токи в обеих катушках пропорциональны одной и той же измеряемой величине. Например, для вольтметра в обеих ка-

тушка течет одинаковый ток, поэтому $I_1 = I_2 = I$ и $\alpha = kI^2$. У электродинамического амперметра угол отклонения стрелки также пропорционален квадрату тока.

При использовании электродинамического прибора в качестве ваттметра (рис. 6.4, в) обмотку неподвижной катушки включают в цепь последовательно (тогда $I_1 = I$), а обмотку подвижной катушки, соединенную последовательно с добавочным резистором R_0 , — параллельно зажимам приемника (тогда $I_2 = U / (R_1 + R_0)$, где R_1 — сопротивление подвижной катушки). Следовательно, в соответствии с формулой (6.8) угол поворота стрелки пропорционален произведению IU , т.е. мощности, потребляемой нагрузкой, причем шкала электродинамического ваттметра равномерна.

Зажимы последовательной обмотки обозначают буквой I или числом ампер, равным предельному значению ее тока, — эта обмотка называется токовой. Зажимы параллельной обмотки или обмотки напряжения, включаемой так же, как вольтметр, обозначают буквой U или числом вольт, равным предельному значению напряжения на ней.

Направление отклонения подвижной системы прибора зависит от взаимного направления токов в катушках. Поэтому для правильного включения обмоток их зажимы маркируют. У так называемых «генераторных» зажимов обмоток (зажимов, к которым следует присоединять провода со стороны источника питания) ставится знак * (звездочка). На электрических схемах их обозначают точками.

На показания электродинамических приборов могут влиять внешние магнитные поля, так как собственное поле катушек слабое. Для устранения этого влияния применяют астатические измерительные механизмы.

Приборы электродинамической системы изготовляют и применяют в основном как переносные лабораторные приборы классов точности: 0,1; 0,2 и 0,5.

К достоинствам электродинамических приборов относятся большая точность и пригодность для измерения в цепях постоянного и переменного тока. Недостатками являются неравномерная шкала; большая чувствительность к перегрузкам (из-за наличия токоведущих пружин) и зависимость от внешних магнитных полей.

Для самопишущих приборов и приборов, в которых требуются большие вращающие моменты, используют ферродинамические измерительные механизмы. В этих устройствах обмотка неподвижной катушки размещается на стальном магнитопроводе, выполненном из листовой электротехнической стали или из специального сплава (пермаллоя), обладающего малыми потерями на гистерезис и вихревые токи. Введение стального сердечника приводит к значительному повышению чувствительности, так как намного увеличивается вращающий момент. Кроме того, ослабляется влияние внешних магнитных полей, но из-за гистерезиса и вихревых токов снижается точность приборов. Ферродинамические приборы изготовляются классов точности 1,0 и 1,5.

В цепях переменного тока с помощью электродинамического ваттметра можно измерять как активную, так и реактивную мощность.

Для измерения активной мощности используют ваттметр с активным добавочным сопротивлением R_0 , включенным в цепь катушки напряжения (подвижной катушки) (рис. 6.4, в).

В этом случае угол отклонения стрелки ваттметра пропорционален активной мощности:

$$\alpha = k_1 I U \cos \varphi . \quad (6.9)$$

Для измерения реактивной мощности последовательно с катушкой напряжения включают добавочное индуктивное сопротивление x_1 (рис. 6.5), величина которого значительно превышает сопротивление обмотки напряжения $x_1 \gg R_1$. В этом случае угол отклонения стрелки ваттметра будет пропорционален реактивной мощности:

$$\alpha = k_2 IU \sin \varphi. \quad (6.10)$$

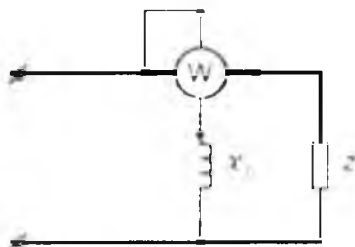


Рис. 6.5

6.6. Однофазный индукционный счетчик электрической энергии

Принцип действия индукционных приборов основан на взаимодействии переменного магнитного поля с вихревыми токами, индуцируемыми этим же полем в проводящем подвижном диске или цилиндре. Индукционные приборы пригодны лишь для переменных токов, так как ток в диске или цилиндре может индуцироваться лишь действием переменного магнитного потока. В настоящее время промышленность выпускает только индукционные счетчики электрической энергии.

Индукционный счетчик имеет две катушки с сердечниками: токовую катушку и катушку напряжения. Поэтому переменное магнитное поле создается

двумя магнитными потоками Φ_1 и Φ_2 , сдвинутыми на некоторый угол по фазе и в пространстве. При этом осуществляется взаимодействие потоков с «чужими» (а не со «своими») индукционными токами.

Токовую катушку (рис. 6.6) навивают толстым проводом на стальной сердечник и включают последовательно с нагрузкой. Магнитный поток Φ_1 в ней пропорционален току нагрузки.

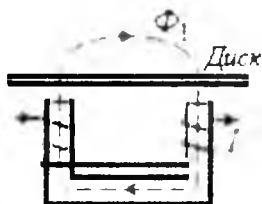


Рис. 6.6

Катушку напряжения (рис. 6.7) навивают большим числом витков тонкого провода на стальной сердечник. Индуктивное сопротивление этого электромагнита намного больше активного, поэтому данную цепь можно считать чисто индуктивной (ток в катушке напряжения отстает по фазе на $\pi/2$).

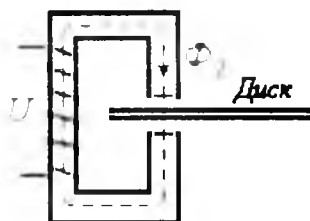


Рис. 6.7

Таким образом, счетчик состоит из двух электромагнитов и подвижного алюминиевого диска. Схематически устройство индукционного однофазного

счетчика показано на рис. 6.8. Легкий алюминиевый диск D укреплен на оси, которая связана с помощью червячной передачи со счетным механизмом, и вращается в зазоре электромагнитов. Магнитный поток Φ_1 электромагнита U -образной формы (рис. 6.6) создается током приемника электрической энергии, так как его обмотка включена последовательно в цепь нагрузки. Можно считать, что поток Φ_1 пропорционален току: $\Phi_1 \sim I$.

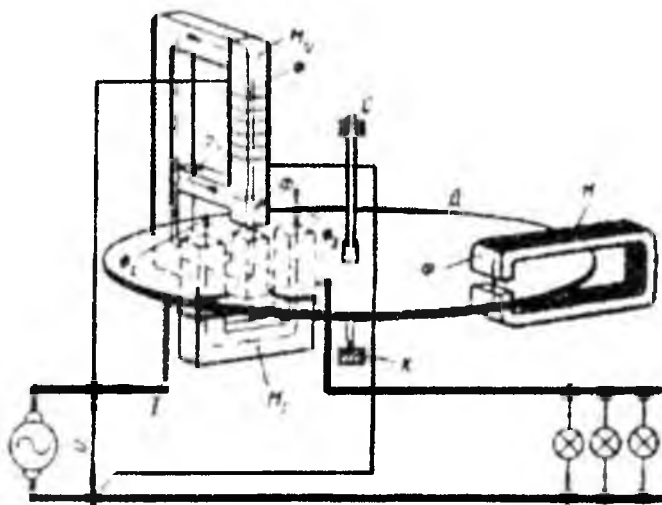


Рис. 6.8

На втором электромагните (рис. 6.7) расположена обмотка, включенная параллельно приемнику электрической энергии, и ток в ней пропорционален напряжению сети U . Обмотка состоит из большого числа витков тонкого провода и создает магнитный поток Φ_2 , значение которого пропорционально U :

$\Phi_2 \sim U$. Индуктивное сопротивление этого электромагнита несравненно больше активного, поэтому можно считать, что ток в его обмотке сдвинут по фазе от напряжения на $\pi/2$. Таким образом, магнитные потоки, сдвинутые по фазе и в пространстве, образуют «бегущее» магнитное поле, пересекающее диск.

Вихревые токи, индуцируемые в диске магнитными потоками, пропорциональны им: $I_{o1} \sim \Phi_1$ и $I_{o2} \sim \Phi_2$. Среднее за период значение электромагнитной силы, возникающей при взаимодействии магнитного поля и вихревого тока и действующей на диск, определяется формулой $F = \Phi I \cos \gamma$, где γ — угол сдвига по фазе между потоком Φ и током I . Из этой формулы видно, что взаимодействие между индуцированным током в диске и созданным им магнитным полем не создает электромагнитной силы, так как $\gamma = 0$. Электромагнитные силы появляются только в результате взаимодействия магнитного потока Φ_1 с током I_{o2} и потока Φ_2 с током I_{o1} и создают вращающий момент.

Под действием этого вращающего момента диск пришел бы в ускоренное вращение, и число оборотов не соответствовало бы израсходованной электрической энергии. Поэтому необходимо наличие противодействующего момента.

Противодействующий момент создается постоянным магнитом, в поле которого вращается диск, и является тормозным моментом, пропорциональным частоте вращения диска. Когда моменты равны, частота вращения диска постоянна (установившийся режим) и число оборотов диска пропорционально расходу электроэнергии.

Индукционные счетчики обладают слабой чувствительностью к внешним магнитным полям и изменениям температуры окружающей среды и

хорошо выдерживают перегрузки. Однако они очень чувствительны к изменению частоты переменного тока в сети, поэтому предназначаются для работы только на определенной частоте (обычно 50 Гц).

6.7. Омметр

Сопротивления различных элементов электрических цепей изменяются в очень широком диапазоне. Сопротивления условно можно разделить на малые (до 1 Ом), средние (от 1 до 100 кОм) и большие (более 100 кОм). Для измерения сопротивлений используют следующие методы: косвенный метод (с помощью амперметра и вольтметра, с последующим вычислением сопротивления), метод непосредственной оценки и метод сравнения (с помощью мостов и потенциометров).

Для непосредственного измерения сопротивлений применяют омметры – приборы, у которых шкала проградуирована в омах. Обычно омметр – это прибор, объединяющий в одном корпусе миллиамперметр магнитоэлектрической системы, источник питания (батарейку) и ограничивающий ток добавочный резистор R (рис. 6.9).

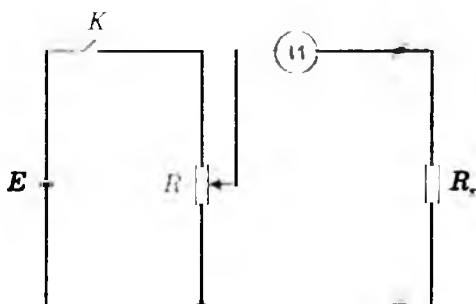


Рис. 6.9

Так как малому сопротивлению соответствует большой ток (и наоборот), то для нахождения положения нулевого деления на шкале замыкают ключ K и перемещением движка резистора R добиваются наибольшего отклонения стрелки. Это положение стрелки соответствует нулевому делению шкалы. Затем, подключая известные сопротивления, градуируют шкалу в омах. Отсчет по такой шкале ведется справа налево, а так как по закону Ома между током и сопротивлением существует обратно пропорциональная зависимость, то шкала омметра неравномерна. Она сильно сжата у конца, соответствующего большим сопротивлениям.

Для измерения больших сопротивлений (сопротивления изоляции электрических машин, аппаратов, приборов и электрической сети напряжением до 1000 В) применяются мегаомметры. Омметры с электроизмерительным механизмом позволяют измерять сопротивления, не превышающие нескольких тысяч МОм. Для измерения больших сопротивлений используются электронные омметры (тераомметры).

6.8. Термоэлектрические и детекторные приборы

Термоэлектрический измерительный прибор представляет собой сочетание термоэлектрического преобразователя и электроизмерительного механизма постоянного тока. Применяется для измерения силы и напряжения (реже мощности) электрического тока. Особенно часто применяется при измерении несинусоидальных токов и на повышенных частотах.

На рис. 6.10 изображена схема термоэлектрического амперметра. Измеряемый ток проходит через

подогреватель Π (обмотка с большим удельным сопротивлением) и нагревает его. Спай термопары T прикреплен к подогревателю или находится вблизи него. ЭДС термопары создает ток, проходящий через магнитоэлектрический прибор. Таким образом, показания термоэлектрического прибора пропорциональны мощности, расходуемой на нагревание подогревателя (т.е. квадрату действующего значения тока в нем). Поэтому шкала такого прибора почти квадратична и градуируется в единицах действующего значения тока (в случае вольтметра – действующего значения напряжения).

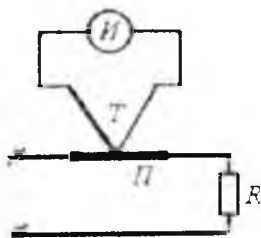


Рис. 6.10

Показания термоэлектрического измерительного прибора слабо зависят от частоты (поэтому они применяются в цепях как постоянного, так и переменного тока) и формы кривой тока или напряжения. В наиболее точных приборах (до 100–150 мА) для ограничения потерь тепла подогреватель вместе с термопарой помещают в вакуумный стеклянный баллон.

Детекторный прибор – это совокупность выпрямителя (детектора) и магнитоэлектрического измерителя. Такое сочетание вызвано необходимостью измерений малых токов и напряжений переменного тока. Наибольшее распространение получила мостовая схема с двухполупериодным выпрямителем.

лем (рис. 6.11). Если в этой схеме подобрать все четыре диода одинаковыми, то сопротивления переменному току по обоим направлениям также будут одинаковыми. Через прибор проходит ток в обе половины периода в одном направлении, вдвое увеличивая значение вращающего момента.



Рис. 6.11

Детекторные приборы широко применяют для измерений переменных токов и напряжений и часто используют в комбинированных приборах – авометрах.

В отличие от приборов переменного тока всех других систем детекторные приборы измеряют среднее, а не действующее значение переменного тока и напряжения. Градуируют шкалы этих приборов в действующих значениях, поэтому детекторные приборы не пригодны для измерений в цепях несинусоидальных токов.

6.9. Цифровые измерительные приборы

Цифровой электроизмерительный прибор – это такой прибор, в котором значение измеряемой электрической величины представлено в виде цифр. Показания цифровых приборов легче читать, и они обеспечивают большую точность, чем аналоговые. Однако аналоговые приборы обеспечивают возможность проследить за быстрыми изменениями тока и напряжения. Цифровые приборы применяются для измерений практически всех электрических величин (постоянного и переменного напряжения и тока, сопротивления, емкости, индуктивности, добротности).

сти и др.), а также неэлектрических величин (например, давления, температуры, скорости), предварительно преобразованных в электрические.

Принцип действия цифровых измерительных приборов основан на автоматическом преобразовании непрерывной, или аналоговой, измеряемой величины в дискретные сигналы в виде кода, в соответствии с которым ее значение отображается на дисплее в цифровой форме. Представление аналоговых сигналов в виде дискретного кода очень удобно, поскольку в таком виде аналоговые сигналы могут вводиться в ЭВМ или передаваться по каналам телеметрии.

Большинство цифровых электроизмерительных приборов состоит из следующих частей: измерительной цепи, выполняющей необходимые аналоговые преобразования измеряемой величины (измерительный мост, измерительный усилитель, преобразователь напряжения во временной интервал и др.), аналого-цифрового преобразователя и дешифратора, в котором кодированный сигнал преобразуется в соответствующее число и затем отображается на дисплее.

Существует несколько методов преобразования непрерывной величины в дискретную, из которых наибольшее распространение получил метод число-импульсного кодирования. Этим методом измеряемая величина преобразуется в пропорциональное ей число импульсов, которое подсчитывается цифровым электронным счетчиком. Электронные счетчики ведут счет импульсов, как правило, в двоичной системе счисления. Применение двоичной системы счисления в цифровых приборах обусловлено тем, что для записи чисел в ней нужны элементы, имеющие всего два устойчивых состояния.

Результат измерения, полученный в двоичной системе счисления, с помощью специального устройства – дешифратора – переводится в десятичную систему, а затем выдается на световое табло.

6.10. Измерение неэлектрических величин электрическими методами. Датчики

На практике часто возникает необходимость измерять неэлектрические величины. Проще всего это достигается с помощью электрических методов, хотя сами измеряемые параметры не являются электрическими.

Любой электрический прибор, предназначенный для измерения неэлектрической величины, имеет в своем составе измерительный преобразователь неэлектрической величины в электрическую (датчик). В качестве электрического измерительного устройства преобразованной величины применяют магнитоэлектрический милливольтметр, цифровой измерительный прибор и др. При этом шкалу отсчетного устройства электроизмерительного прибора градуируют в единицах измеряемой неэлектрической величины.

Датчики разнообразны по принципу действия. В индуктивных преобразователях используется зависимость индуктивности обмоток от положения, геометрических размеров и магнитного состояния элементов их магнитной цепи. Емкостные преобразователи основаны на зависимости электрической емкости конденсатора от размеров и взаимного расположения его обкладок. В пьезоэлектрических преобразователях используется эффект появления электрических зарядов на поверхности некоторых кри-

сталлов (кварца, титаната бария и др.) под влиянием механических напряжений.

Простейшим примером датчика является термопара. ЭДС термопары является функцией температуры. В качестве электрического измерительного устройства используют милливольтметр, который может иметь шкалу, отградуированную в градусах.

Индукционные датчики чаще всего применяются в приборах для измерения угловой скорости, линейных и угловых перемещений и ускорений. Так, действие индуктивного датчика с разомкнутой магнитной цепью основано на изменении индуктивности катушки по мере внесения в нее стального сердечника. Если небольшой генератор соединить с вращающимся или прямолинейно движущимся механизмом, то его ЭДС будет пропорциональна скорости вращения (движения). Таким образом, по значению ЭДС можно судить о скорости движения.

Электроизмерительные приборы, используемые для измерения неэлектрических величин, имеют ряд преимуществ перед неэлектрическими приборами. Здесь прежде всего следует отметить их низкую инерционность, т.е. возможность быстро реагировать на изменение измеряемой величины, широкий диапазон измерений соответствующей величины, возможность включения их в электрические цепи, а поэтому использование их при дистанционном и автоматическом управлении технологическими процессами.

Вопросы для повторения

1. Что такое абсолютная погрешность электроизмерительного прибора?
2. Что такое класс точности электроизмерительного прибора?

3. Какие условные обозначения имеются на шкале электроизмерительного прибора?
4. Для чего служит корректор?
5. Для чего служит успокоитель?
6. Как действует магнитный успокоитель?
7. Как действует воздушный успокоитель?
8. Опишите устройство и принцип действия магнитоэлектрического электроизмерительного прибора.
9. Опишите устройство и принцип действия электромагнитного электроизмерительного прибора.
10. Опишите устройство и принцип действия электродинамического электроизмерительного прибора.
11. Как надо соединить обмотки электродинамического прибора, чтобы использовать его как амперметр?
12. Как надо соединить обмотки электродинамического прибора, чтобы использовать его как вольтметр?
13. Как надо включить электродинамический прибор, чтобы измерить активную мощность на переменном токе?
14. Как надо включить электродинамический прибор, чтобы измерить реактивную мощность на переменном токе?
15. Как устроен омметр?
16. Почему у омметра нулевое деление шкалы находится справа?
17. Как устроен термоэлектрический прибор?
18. Как устроен детекторный прибор?
19. Как устроен и работает счетчик электрической энергии?
20. Опишите принцип действия цифрового измерительного прибора.
21. Приведите пример измерения неэлектрической величины с помощью датчика.

Глава 7. Трансформаторы

7.1. Устройство и принцип работы трансформатора

Трансформатор – это статический электромагнитный аппарат, служащий для преобразования электрической энергии переменного тока одного напряжения в электрическую энергию переменного тока того же или иного напряжения при неизменной частоте.

Трансформатор состоит из двух основных частей: *магнитопровода* (сердечника) и *обмоток*. Для уменьшения потерь от вихревых токов, возникающих при перемагничивании, сердечники собирают из отдельных тонких (0,3–0,5 мм) пластин специальной трансформаторной стали. Эта сталь характеризуется узкой петлей гистерезиса (см. разд. 3.2) и большим электрическим сопротивлением. Для уменьшения потерь от вихревых токов пластины изолируют друг от друга путем покрытия их изолирующими пленками.

Простейший однофазный трансформатор состоит из стального сердечника и двух обмоток – первичной и вторичной (рис. 7.1). Если к первичной обмотке трансформатора подвести переменное напряжение U_1 , то в ней появится некоторый ток I_1 , кото-

рый создаст в сердечнике переменный магнитный поток Φ_0 .

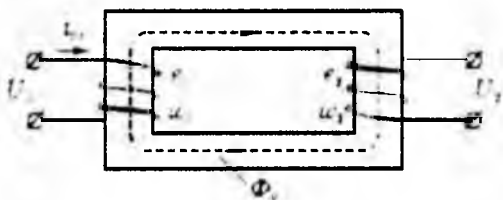


Рис. 7.1

Этот поток по закону электромагнитной индукции наведет в обеих обмотках ЭДС индукции e_1 и e_2 :

$$\begin{aligned} e_1 &= -w_1 \frac{\Delta \Phi_0}{\Delta t}; \\ e_2 &= -w_2 \frac{\Delta \Phi_0}{\Delta t}. \end{aligned} \quad (7.1)$$

где w_1, w_2 — число витков в первичной и вторичной обмотках соответственно.

Если приложенное напряжение

$$U_1 = U_{a1} \sin \omega t,$$

то в идеальном трансформаторе (без потерь) его первичная обмотка будет представлять собой чистую индуктивность и ток будет отставать по фазе от напряжения на $\pi/2$:

$$i_{01} = I_{01m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}), \quad (7.2)$$

а магнитный поток будет совпадать по фазе с создающим его током:

$$\Phi_0 = \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = -\Phi_m \cos \omega t. \quad (7.3)$$

Тогда ЭДС e_1 и e_2 будут равны:

$$\begin{aligned} e_1 &= -w_1 \frac{d\Phi_0}{dt} = -w_1 \omega \Phi_m \sin \omega t = -E_{m1} \sin \omega t; \\ e_2 &= -w_2 \frac{d\Phi_0}{dt} = -w_2 \omega \Phi_m \sin \omega t = -E_{m2} \sin \omega t. \end{aligned} \quad (7.4)$$

Поскольку для идеального трансформатора в соответствии со вторым законом Кирхгофа $u_1 = -e_1$ и $u_2 = e_2$, то

$$\left| \frac{u_2}{u_1} \right| = \left| \frac{e_2}{e_1} \right| \quad \text{или} \quad \frac{|U_2|}{|U_1|} = \frac{E_{m2}}{E_{m1}} = \frac{w_2}{w_1} = k, \quad (7.5)$$

где k — коэффициент трансформации.

Мы видим, что отношение напряжений на вторичной и первичной обмотках трансформатора равно отношению чисел витков в этих обмотках. Отметим, что формула (7.5) выполняется точно только для идеального трансформатора или в режиме холостого хода.

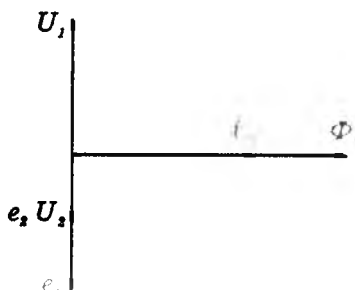


Рис. 7.2

Таким образом, трансформатор преобразует подведенное к нему напряжение в соответствии с отноше-

нием числа витков его обмоток. Векторная диаграмма идеального трансформатора показана на рис. 7.2.

Преобразование электрической энергии в трансформаторе сопровождается потерями. В отличие от электрических машин трансформатор не имеет движущихся частей, поэтому механические потери при работе отсутствуют. Имеющиеся потери обусловлены явлением гистерезиса, вихревыми токами, потоками рассеяния магнитного поля и активным сопротивлением обмоток.

Как известно, ферромагнитные материалы состоят из небольших областей самопроизвольного намагничивания, которые называются *доменами*.

Магнитные моменты всех доменов по всему объему ферромагнетика ориентированы беспорядочно, поэтому результирующий магнитный момент всего ферромагнетика в отсутствие внешнего магнитного поля равен нулю. Если ферромагнетик поместить в магнитное поле, то магнитные моменты отдельных доменов получают преимущественную ориентацию в направлении поля. Чем больше индукция внешнего поля B , тем сильнее эта ориентация, тем сильнее намагничивается ферромагнетик. При некоторой достаточной величине внешнего поля все магнитные моменты доменов оказываются ориентированными вдоль поля.

Если ферромагнетик поместить в переменное магнитное поле, создаваемое переменным током, то ферромагнетик будет циклически перемагничиваться с частотой переменного тока. При этом домены будут менять свою ориентацию с такой же частотой. При переориентациях доменов совершается работа из-за внутреннего трения доменов друг о друга.

Как известно, в ферромагнетике, подвергнутом циклическому перемагничиванию, магнитный поток связан с током зависимостью, выражаемой петлей

гистерезиса. При этом при каждом перемагничивании сердечника затрачивается работа, пропорциональная площади петли гистерезиса. Эта работа вследствие внутреннего трения идет на нагревание сердечника.

Для уменьшения потерь на гистерезис сердечники трансформаторов изготавливают из специальной трансформаторной стали.

Вихревые токи, или *токи Фуко*, возникающие в проводниках, находящихся в переменных магнитных полях, создаются и в сердечнике трансформатора. Замыкаясь в толще сердечника, эти токи нагревают его и приводят к потерям энергии. Поскольку вихревые токи возникают в плоскостях, перпендикулярных магнитному потоку, то для их уменьшения сердечники трансформаторов набирают из отдельных изолированных друг от друга стальных пластин.

Потоки рассеяния в сердечнике трансформатора создаются той частью магнитного потока, которая замыкается не через магнитопровод, а через воздух в непосредственной близости от витков. Потоки рассеяния составляют около одного процента от основного магнитного потока трансформатора.

Активное сопротивление обмоток создает потери за счет активных токов, нагревающих обмотки. Для их уменьшения обмотки трансформаторов выполняют, как правило, из меди.

7.2. Режимы работы трансформатора

Режим работы трансформатора, при котором его вторичная обмотка разомкнута, называют *режимом холостого хода* (трансформатор работает без нагрузки). Режим работы трансформатора, при котором

во вторичную обмотку включена нагрузка, называют *рабочим*.

В режиме холостого хода основной магнитный поток в сердечнике Φ_0 создает в первичной обмотке ЭДС самоиндукции, которая уравнивает большую часть приложенного напряжения. Так будет до тех пор, пока вторичная обмотка разомкнута. Если во вторичную обмотку включить нагрузку, то в ней появится ток I_2 , возбуждающий в том же сердечнике свой магнитный поток Φ_1 , знак которого в соответствии с правилом Ленца противоположен знаку магнитного потока Φ_0 , создаваемому первичной обмоткой (рис. 7.3).

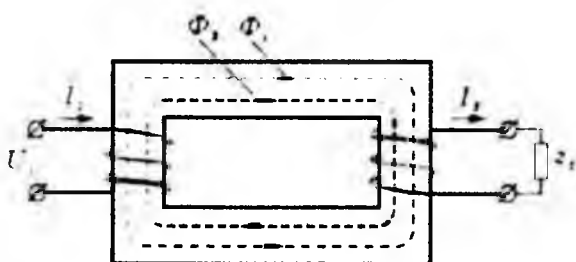


Рис. 7.3

В результате суммарный магнитный поток в сердечнике уменьшится, а это приведет к уменьшению ЭДС E_1 в первичной обмотке. Вследствие этого часть приложенного напряжения U_1 окажется неуравновешенной, что приведет к увеличению тока в первичной обмотке. Очевидно, что ток в первичной обмотке будет возрастать до тех пор, пока не прекратится размагничивающее действие тока нагрузки. После этого суммарный магнитный поток восстановится приблизительно до прежнего значения Φ_0 .

При увеличении сопротивления вторичной обмотки уменьшаются ток I_2 и магнитный поток Φ_1 , что

приводит к возрастанию суммарного магнитного потока и, следовательно, к возрастанию E_1 . В результате нарушится равновесие между приложенным напряжением U_1 и ЭДС E_1 : их разность уменьшится, а следовательно, уменьшится и ток I_1 до такого значения, при котором суммарный магнитный поток вернется к прежнему значению.

Таким образом, магнитный поток в трансформаторе остается практически постоянным как в режиме холостого хода, так и режиме переменной нагрузки. Это свойство трансформатора называют *способностью саморегулирования*, т. е. способностью автоматически регулировать значение первичного тока I_1 при изменении тока нагрузки I_2 .

7.3. Коэффициент полезного действия трансформатора

Как уже говорилось, преобразование электрической энергии в трансформаторе сопровождается потерями. Коэффициент полезного действия трансформатора (к. п. д.) – это отношение отдаваемой активной мощности к потребляемой:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%, \quad (7.6)$$

где P_1 – мощность, потребляемая из сети, P_2 – мощность, отдаваемая нагрузке. Таким образом, для практического определения к.п.д. трансформатора при номинальной нагрузке необходимо измерить мощности в первичной и вторичной обмотках. Это измерение можно значительно упростить, включив во вторичную обмотку активную нагрузку. Тогда $\cos \varphi \approx 1$ (поток рассеяния невелик), и мощность P_2 может быть вычислена по показаниям амперметра

и вольтметра, включенных во вторичную цепь. Такой метод определения к.п.д. называется *методом непосредственных измерений*. Он весьма прост, но имеет два существенных недостатка: малую точность и неэкономичность. Первый из них обусловлен тем, что к.п.д. промышленных трансформаторов очень высок (до 99%), поэтому мощности P_2 и P_1 иногда мало отличаются по величине. В этом случае незначительные ошибки в показаниях приборов приведут к большим ошибкам в значении к.п.д. Неэкономичность этого способа связана с большим расходом электроэнергии за время испытания, так как трансформатор приходится нагружать до номинальной мощности. Поэтому метод непосредственных измерений не нашел промышленного применения, но может быть использован для трансформаторов малой мощности с небольшим к.п.д. (например, в учебной практике).

На практике к.п.д. трансформаторов определяют *косвенным методом*, т.е. путем раздельного определения потерь. При этом исходят из того, что к.п.д. трансформатора может быть представлен в следующем виде:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{ст} + P_{м}} \quad (7.7)$$

где $P_{ст}$ — потери в стали (в сердечнике), а $P_{м}$ — потери в меди (в обмотках). Потери в стали и потери в меди измеряют в опытах холостого хода и короткого замыкания соответственно.

В опыте холостого хода, в котором на первичную обмотку подают номинальное напряжение, а вторичную обмотку оставляют разомкнутой, определяют *потери в стали*, т.е. потери на гистерезис и вихревые токи. Так как при номинальном напряжении на первичной обмотке магнитный поток практически

ки постоянен, то независимо от того, нагружен трансформатор или нет, потери в стали для него являются постоянной величиной. Таким образом, можно считать, что в режиме холостого хода энергия, потребляемая трансформатором из сети, расходуется только на потери в стали, поэтому мощность этих потерь измеряют ваттметром, включенным в цепь первичной обмотки. При этом, правда, не учитываются потери на нагревание провода первичной обмотки током холостого хода. Но этот ток невелик, и потери от него также невелики. В этом опыте определяется также коэффициент трансформации k и ток холостого хода I_{01} .

Если вторичную обмотку трансформатора замкнуть накоротко, а на первичную обмотку подать такое пониженное напряжение, при котором токи в обмотках не превышают номинальных значений, то энергия, потребляемая трансформатором из сети, расходуется в основном на тепловые потери в проводах обмоток трансформатора. В самом деле, при короткозамкнутой вторичной обмотке к первичной подводится пониженное напряжение, поэтому магнитный поток очень мал и потери в стали, зависящие от значения магнитного потока, также малы. Этот опыт называют опытом *короткого замыкания*. Следовательно, ваттметр, включенный в цепь первичной обмотки трансформатора в этом опыте, покажет мощность, соответствующую потерям в меди (P_m).

7.4. Трехфазные трансформаторы

Для преобразования тока трехфазной системы можно воспользоваться группой из трех однофазных трансформаторов, обмотки которых могут быть соединены либо звездой (рис. 7.4, а), либо треугольником (рис. 7.4, б). В этом случае каждый транс-

форматор работает независимо от остальных как обычный однофазный трансформатор, включенный в одну из фаз трехфазной системы.

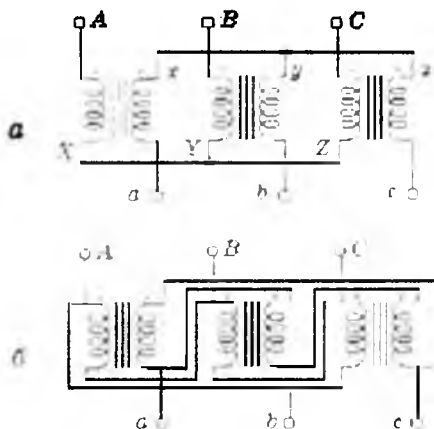


Рис. 7.4

На практике значительно чаще применяют трехфазные трансформаторы, выполненные на одном магнитопроводе (рис. 7.5). При этом три магнитных потока, возбуждаемые токами в первичных обмотках, замыкаются через два других стержня сердечника.

При изготовлении трехфазных трансформаторов на каждый стержень его сердечника навивают по две обмотки: низкого напряжения, а поверх нее — высокого напряжения. Выводы обмоток принято обозначать следующим образом: начала обмоток — заглавными буквами латинского алфавита A, B и C для обмоток высокого напряжения и строчными буквами a, b и c для обмоток низкого напряжения; концы обмоток — буквами X, Y и Z для обмоток высокого напряжения и буквами x, y и z — для обмоток низкого напряжения.

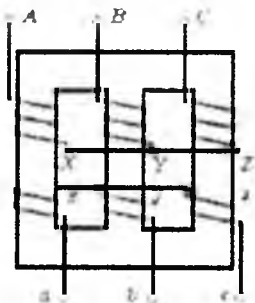


Рис. 7.5

Обмотки трехфазного трансформатора обычно соединяют звездой или треугольником. Наиболее простым и дешевым является первый способ. В этом случае каждая обмотка и ее изоляция при заземлении нулевой точки должны быть рассчитаны только на фазное напряжение и линейный ток. Поскольку число витков обмотки трансформатора прямо пропорционально напряжению, то при соединении звездой каждая обмотка требует меньшего количества витков при большем сечении провода; при этом изоляция проводников должна быть рассчитана лишь на фазное напряжение. Такое соединение широко применяется для трансформаторов небольшой и средней мощности. Соединение звездой наиболее желательно для высокого напряжения, так как изоляция рассчитывается лишь на фазное напряжение. Соединение треугольником удобнее при больших токах и в тех случаях, когда нагрузки могут быть подключены без нулевого провода.

Применяется также комбинированное включение трехфазных трансформаторов (первичные обмотки соединены звездой, а вторичные – треугольником, или наоборот). Соединение звезда/треугольник часто используют для трансформаторов большой мощнос-

ти в тех случаях, когда на стороне низкого напряжения не требуется нулевой провод.

Из соотношений в трехфазной системе следует, что при трехфазной трансформации только отношение фазных напряжений всегда приблизительно равно отношению чисел витков первичной и вторичной обмоток. Отношение же линейных напряжений зависит от способа соединения обмоток трансформатора. При одинаковом способе соединения (звезда/звезда или треугольник/треугольник) отношение линейных напряжений равно фазному коэффициенту трансформации. Но при комбинированных способах соединения (звезда/треугольник или треугольник/звезда) отношение линейных напряжений меньше или больше этого коэффициента в $\sqrt{3}$ раз. Это дает возможность регулировать вторичное линейное напряжение трансформатора соответствующим изменением схемы соединения его обмоток.

7.5 Автотрансформатор

Автотрансформатор представляет собой трансформатор, у которого обмотка низкого напряжения является частью обмотки высокого напряжения (рис. 7.6).

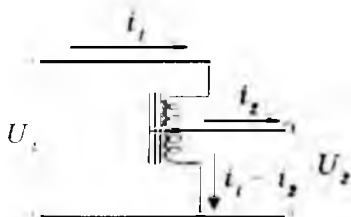
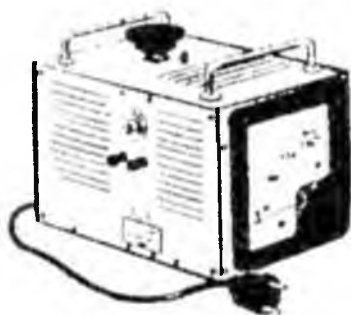


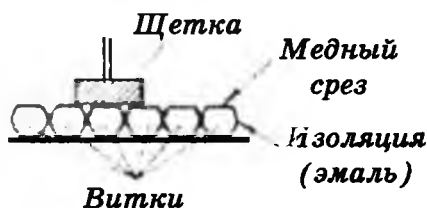
Рис. 7.6

У однофазного автотрансформатора всего одна обмотка. В режиме холостого хода автотрансформатор ничем не отличается от обычного трансформатора. В режиме нагрузки по общей части витков протекает ток, который равен разности токов ($i_1 - i_2$), так как вторичный ток ослабляет магнитный поток в сердечнике (т. е. соответствующий магнитный поток имеет знак, противоположный знаку потока, создаваемого током первичной обмотки).

Чаще всего автотрансформаторы изготавливают со скользящим контактом, что позволяет плавно регулировать выходное напряжение в широких пределах. Примером может служить лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) (рис. 7.7, а).



а



б

Рис. 7.7

Обмотка этого трансформатора выполнена проводом круглого сечения на тороидальном стальном сердечнике. На одной торцевой стороне изоляцию снимают вместе с частью самого провода, но при этом витки остаются изолированными друг от друга (рис. 7.7, б). По оголенной поверхности витков скользит небольшая щетка, подключая нагрузку к различному числу витков и изменяя тем самым выходное напряжение. Так как перемещающаяся щетка замыкает накоротко сразу 1–2 витка, то при хорошем контакте между ними эти витки могут сгореть. Чтобы этого не случилось, щетку делают из графита, сопротивление которого достаточно велико для ослабления токов в короткозамкнутых витках.

Если часть обмотки автотрансформатора сделать первичной, а всю обмотку вторичной, то автотрансформатор будет повышающим.

7.6. Измерительные трансформаторы

В технике больших токов и высоких напряжений измерения электрических величин производят только через измерительные трансформаторы — *трансформаторы тока* и *трансформаторы напряжения*, так как непосредственные измерения с помощью шунтов и добавочных резисторов весьма затруднительны. Так, наибольший ток, который еще можно измерить путем непосредственного включения прибора, составляет 600 А, а напряжение — 2000 В. К тому же шунты и добавочные сопротивления получаются громоздкими и дорогими, а прикосновение к таким приборам в сетях высокого напряжения опасно для жизни.

Трансформатор тока состоит из сердечника и двух обмоток — первичной и вторичной (рис. 7.8).

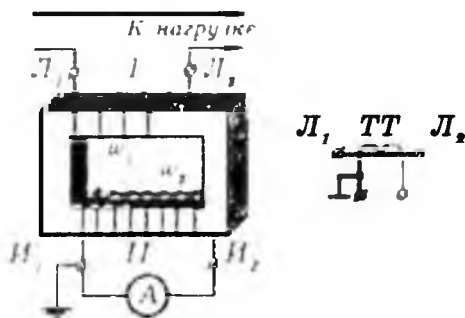


Рис. 7.8

Первичную обмотку, которая содержит небольшое количество витков, включают последовательно с нагрузкой, в цепи которой необходимо измерить ток, а к вторичной обмотке, с большим числом витков, подключают амперметр. Так как сопротивление амперметра мало, то можно считать, что трансформатор тока работает в режиме короткого замыкания, при котором суммарный магнитный поток равен разности потоков, созданных первичной и вторичной обмотками.

Измеряемый ток, протекая по первичной обмотке с низким сопротивлением, создает на ней весьма небольшое падение напряжения, которое трансформируется во вторичную обмотку. Поскольку число витков вторичной обмотки значительно больше, чем у первичной, то на ней получается значительно большее напряжение при меньшем токе.

Трансформатор тока применяют не только для определения силы тока, но и для включения токовых обмоток ваттметров и некоторых других приборов. Выводы обмоток трансформатора тока маркируют следующим образом: первичная обмотка — L_1 и L_2 (линия), вторичная — I_1 и I_2 (измеритель). На рис. 7.8

также изображено схематическое обозначение трансформатора тока.

Один и тот же трансформатор тока можно использовать для одновременного включения нескольких измерительных приборов (рис. 7.9), однако желательно, чтобы их было не больше двух. Это объясняется тем, что по мере увеличения числа приборов их общее сопротивление возрастает, и режим работы трансформатора тока все более отходит от режима короткого замыкания (уменьшается ток вторичной обмотки).

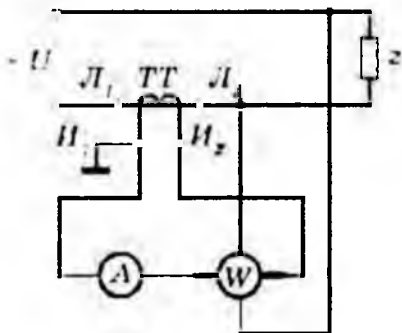


Рис. 7.9

Трансформатор тока не только расширяет пределы измерения приборов, но и гальванически отделяет вторичную цепь от первичной, изолируя тем самым прибор от высоких напряжений сети. Поэтому измерительные приборы монтируют обычным способом на распределительных щитах. При этом для безопасности один вывод вторичной обмотки заземляют для того, чтобы при пробое изоляции между обмотками провод с высоким потенциалом оказался замкнутым на землю. Трансформаторы тока изготавливают таким образом, чтобы номинальный ток вторичной обмотки составлял 5 А.

Вторичную обмотку работающего трансформатора тока нельзя размыкать и оставлять разомкнутой. Она всегда должна быть замкнута на прибор или закорочена. Это следует делать потому, что при разомкнутой вторичной обмотке магнитный поток в сердечнике обусловлен лишь большим первичным током, а не разностью потоков первичного и вторичного токов. Этот большой магнитный поток создаст на вторичной обмотке высокое напряжение, опасное для жизни. Кроме того, большой магнитный поток может вызвать перегрев сердечника.

Конструктивно трансформаторы тока выполняют по-разному. Все они, как правило, имеют несколько коэффициентов трансформации. Наиболее удобный переносной трансформатор тока – измерительные клещи (рис. 7.10).

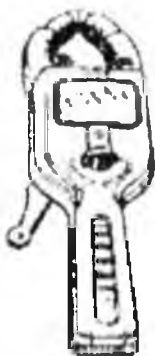


Рис. 7.10

Это трансформатор с разъемным сердечником, смонтированный в одном корпусе с амперметром. При нажатии на рукоятку сердечник размыкается и им обхватывается провод с измеряемым током. После отпускания рукоятки специальная пружина плотно замыкает сердечник, и амперметр показы-

вает силу тока в проводе. В данном случае провод с измеряемым током выступает в роли первичной обмотки. Измерительные клещи очень удобны, так как позволяют измерять ток в любом месте линии без разрыва провода, хотя точность таких измерений невысока.

Трансформатор напряжения состоит из сердечника и двух обмоток – первичной и вторичной (рис. 7.11).

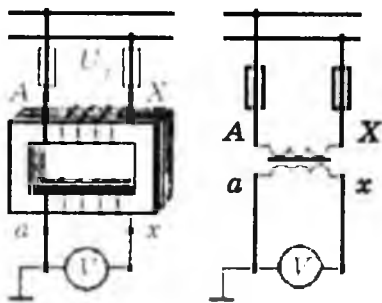


Рис. 7.11

Первичная обмотка содержит значительно больше витков, чем вторичная. На первичную обмотку подается измеряемое напряжение U_1 , а к вторичной обмотке подсоединяется вольтметр. Поскольку сопротивление вольтметра велико, то по вторичной обмотке течет небольшой ток, и можно считать, что трансформатор напряжения работает в режиме холостого хода, т. е. изменения вторичного напряжения пропорциональны изменениям первичного при постоянном коэффициенте трансформации. Фаза вторичного напряжения противоположна фазе первичного. Выводы трансформатора напряжения обозначают следующим образом: выводы первичной обмотки – А, Х, выводы вторичной – а, х. Все трансформаторы напряжения изготавливают таким

образом, чтобы номинальное напряжение вторичной обмотки было равно 100 В.

В целях безопасности обслуживающего персонала один зажим вторичной обмотки и стальной кожух трансформатора напряжения обязательно заземляют для того, чтобы при пробое изоляции между обмотками провод с высоким потенциалом оказался замкнутым на землю. Конструктивно трансформаторы напряжения очень похожи на маломощные силовые трансформаторы.

Вопросы для повторения

1. Объясните устройство и принцип действия трансформатора.
2. Перечислите потери в трансформаторе и объясните их физическую природу.
3. Почему сердечник трансформатора собирают из тонких листов трансформаторной стали, изолированных друг от друга?
4. Что называется коэффициентом трансформации?
5. Какой режим работы трансформатора называется холостым ходом?
6. Почему при любом изменении нагрузки трансформатора магнитный поток в его сердечнике остается практически неизменным?
7. Какие методы измерения к.п.д. трансформатора вы знаете?
8. Каково устройство трехфазного трансформатора?
9. Как соединяются между собой обмотки трехфазных трансформаторов?
10. Объясните устройство автотрансформатора.
11. Как включают трансформатор тока, и в каком режиме он работает?
12. Как включают трансформатор напряжения, и в каком режиме он работает?

Глава 8. Асинхронные электрические машины

8.1. Классификация машин переменного тока

Электрические машины делятся на две большие категории: *генераторы*, которые служат для преобразования механической энергии в электрическую, и *двигатели*, которые преобразуют электрическую энергию в механическую. Машины переменного тока в свою очередь делятся на асинхронные и синхронные.

Статор *асинхронной машины* создает вращающееся магнитное поле, а ротор вращается с меньшей скоростью, т.е. асинхронно. Увеличение нагрузки двигателя вызывает уменьшение скорости вращения ротора. Асинхронная машина была изобретена М. О. Доливо-Добровольским еще в 1888 г., но до настоящего времени сохранила свои основные черты.

В *синхронной машине* скорость вращения ротора совпадает со скоростью вращения магнитного поля статора и не зависит от нагрузки двигателя.

Все электрические машины обратимы, т.е. могут служить как двигателями, так и генераторами. Асинхронные машины используются главным образом как двигатели, а синхронные – и как двига-

тели, и как генераторы. Практически все генераторы переменного тока – синхронные.

8.2. Устройство и принцип работы асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель, изобретенный в 1888 г., благодаря простоте своей конструкции и в настоящее время распространен настолько широко, что является основой электропривода.

Принцип работы асинхронных двигателей основан на опыте Араго. Если под горизонтально подвешенным на нити диском из проводящего немагнитного материала (например, из меди) поместить вращающийся подковообразный магнит, то диск начнет вращаться в ту же сторону, что и магнит.

Это явление объясняется следующим образом. Вращающееся магнитное поле, создаваемое магнитом, индуцирует в диске замкнутые вихревые токи. Эти вихревые токи, в соответствии с законом Ампера, взаимодействуют с вращающимся магнитным полем, благодаря чему создается вращающий момент. Диск начинает вращаться в ту же сторону, что и поле, причем по мере увеличения скорости диска скорость диска относительно поля уменьшается, что приводит к уменьшению величины индукционных токов в диске и вращающего момента. Диск начинает приостанавливаться, и скорость диска относительно поля увеличивается, что приводит к повышению величины индукционных токов в диске и вращающего момента. В конце концов установится равновесие, при котором диск будет вращаться с некоторой постоянной скоростью, которая меньше скорости вращения магнитного поля, т.е. вращение диска будет *асинхронным*.

Вот это явление асинхронного вращения диска из проводящего немагнитного материала во вращающемся магнитном поле и положено в основу устройства асинхронных двигателей.

Причиной исключительно широкого распространения асинхронного двигателя являются простота его конструкции и невысокая стоимость.

Основные части асинхронного двигателя изображены на рис. 8.1. Двигатель состоит из статора 1 с рабочими обмотками, ротора 3 с лопастями вентилятора 2 и двух щитов с подшипниками для вала ротора и вентиляционными отверстиями 4.

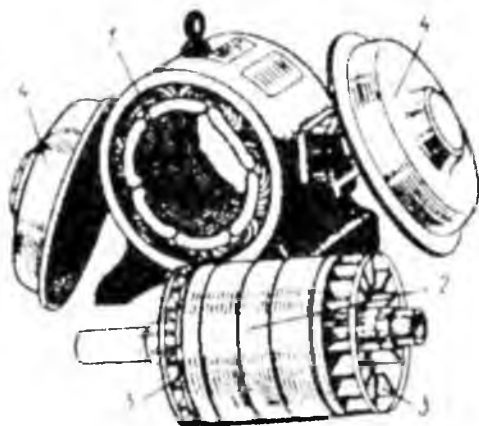


Рис. 8.1

Сердечник статора представляет собой цилиндр, собранный из пластин электротехнической стали, которые для уменьшения потерь от вихревых токов изолированы друг от друга слоями лака. На его внутренней цилиндрической поверхности имеются пазы, расположенные параллельно оси двигателя. В эти пазы укладывается обмотка, к которой подводится

трехфазное напряжение. В простейшем случае обмотка статора состоит из трех секций, сдвинутых в пространстве друг относительно друга на 120° . В этом случае создается двухполюсное вращающееся магнитное поле. Для создания четырехполюсного вращающегося магнитного поля необходимо число секций обмотки увеличить до 6 и т. д. Начала и концы обмоток статора трехфазного асинхронного двигателя выводятся на щиток корпуса. Ротор асинхронного двигателя представляет собой стальной цилиндрический сердечник, собранный из пластин электротехнической стали (см. рис. 8.1), с пазами, в которые уложена обмотка в виде «белчьего колеса» (рис. 8.2). Здесь каждая пара диаметрально противоположных стержней с соединительными кольцами представляет собой рамку, т.е. короткозамкнутый виток. Поэтому такой ротор называется короткозамкнутым.

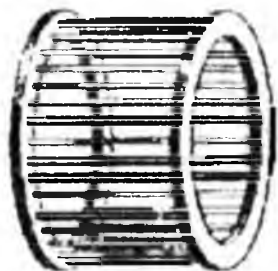


Рис. 8.2

Таким образом, если способное вращаться вокруг оси «белчьё колесо» поместить во вращающееся магнитное поле, то по закону электромагнитной индукции в его стержнях возникнут ЭДС и в короткозамкнутых витках возникнут токи. Эти токи, взаимодействуя согласно закону Ампера с вращающимся-

ся магнитным полем, создадут вращающий момент и приведут «беличье колесо» в асинхронное вращение в ту же сторону, что и поле. Для увеличения вращающего момента короткозамкнутый ротор помещен внутри стального сердечника.

8.3. Создание вращающегося магнитного поля

Если три катушки, расположенные по окружности под углом 120° друг относительно друга, включить в трехфазную сеть переменного тока, а в центре этой окружности поместить магнитную стрелку на оси, то стрелка придет во вращение. Следовательно, эти три катушки создают вращающееся магнитное поле.

Рассмотрим подробнее механизм создания вращающегося магнитного поля. Зависимости токов в катушках от времени изображены на рис. 8.3. Выберем четыре момента времени t_1, t_2, t_3 и t_4 через одну шестую часть периода.

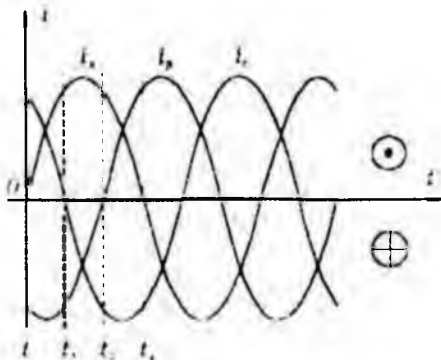


Рис. 8.3

Для каждого из этих моментов последовательно изобразим направления результирующего магнитного поля внутри статора трехфазной машины, которая имеет три обмотки по одному витку (рис. 8.4). Начала обмоток обозначены буквами А, В и С, а концы — X, Y и Z соответственно. Ток в начале обмотки будем считать направленным к нам (обозначается точкой), если его значение положительно. Крестиком обозначено направление от нас.

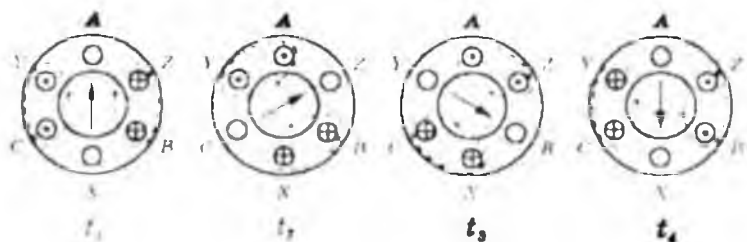


Рис. 8.4

В момент времени t_1 обмотка А–Х потока не создает ($i_A = 0$); в начале обмотки В ток направлен от нас ($i_B < 0$), а в конце этой обмотки Y — к нам; в начале обмотки С ток направлен к нам ($i_C > 0$), а в конце этой обмотки Z — от нас. Таким образом в двух расположенных рядом проводниках С и Y, перпендикулярных к плоскости чертежа, токи в момент t_1 направлены в одну сторону и создают магнитное поле, направленное по правилу буравчика против часовой стрелки, а токи в проводниках В и Z создают магнитное поле, направленное по часовой стрелке. Оба магнитных поля в центре статора имеют одинаковое направление (вверх) и складываются. Направление суммарного магнитного поля показано на рис. 8.4 стрелкой.

Определяя аналогичным образом направление суммарного магнитного поля в моменты времени

t_2 , t_3 и t_4 , мы увидим, что направление магнитного поля за половину периода изменится на 180° . Легко убедиться, что за период направление суммарного магнитного поля сделает один оборот и, следовательно, скорость вращения магнитного поля в данном случае будет равна частоте переменного тока.

Таким образом, внутри статора существует постоянное по значению равномерно вращающееся магнитное поле.

Этот способ создания вращающегося магнитного поля положен в основу устройства трехфазных асинхронных двигателей. Если поменять две любые фазы местами (при этом изменится последовательность токов), то суммарный вектор магнитной индукции B будет вращаться против часовой стрелки. Изменением последовательности фаз пользуются для изменения направления вращения ротора трехфазного асинхронного двигателя, т.е. для реверсирования.

8.4. Скорость вращения магнитного поля.

Скольжение

В предыдущем разделе было показано, что скорость вращения магнитного поля определяется частотой переменного тока. В частности, если трехфазную обмотку двигателя разместить в шести пазах на внутренней поверхности статора (рис. 8.5), то за половину периода переменного тока вектор магнитной индукции сделает пол-оборота, а за полный период – один оборот. В этом случае обмотка статора создает магнитное поле с одной парой полюсов и называется *двухполюсной*.

Если обмотка статора состоит из шести катушек (по две последовательно соединенные катушки на каждую фазу), размещенных в двенадцати пазах,

то за половину периода переменного тока вектор магнитной индукции повернется на четверть оборота, а за полный период – на пол-оборота. Вместо двух полюсов на трех обмотках теперь магнитное поле статора имеет четыре полюса (две пары полюсов).

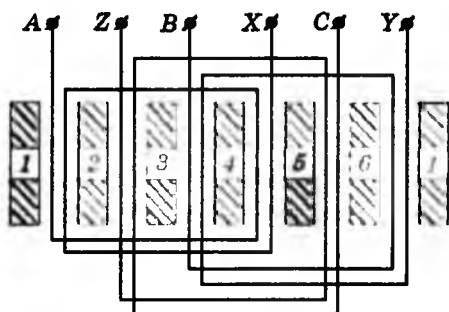


Рис. 8.5

Таким образом, если обмотка статора имеет 2, 3, 4 и т.д. пары полюсов, то вектор магнитной индукции за время одного периода изменения тока повернется соответственно на $1/2$, $1/3$, $1/4$ и т.д. часть окружности статора. В общем случае, обозначив буквой p число пар полюсов, мы можем сделать вывод, что угол, описанный вектором магнитной индукции за время одного периода изменения тока, равен одной p -й части окружности статора и, следовательно, скорость вращения магнитного поля n_1 обратно пропорциональна числу пар полюсов:

$$n_1 = \frac{60f}{p} \text{ (об/мин)}, \quad (8.1)$$

где f – частота переменного тока в Гц, а коэффициент 60 появился из-за того, что n_1 принято измерять в оборотах в минуту.

Поскольку число пар полюсов может быть только целым, то скорость вращения магнитного поля может принимать не произвольные, а только определенные значения:

p	1	2	3	4	5	6	8	12	24
n	3000	1500	1000	750	600	500	375	250	125

Ротор асинхронного двигателя вращается в ту же сторону, что и магнитное поле, со скоростью, несколько меньшей скорости вращения магнитного поля, так как только в этом случае в обмотке ротора будут индуцироваться ЭДС и токи и на ротор будет действовать вращающий момент. Обозначим скорость вращения ротора n_2 . Тогда величина $n_1 - n_2$, которая называется *скоростью скольжения*, представляет собой относительную скорость магнитного поля и ротора, а степень отставания ротора от магнитного поля, выраженная в процентах, называется *скольжением* s :

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100\%. \quad (8.2)$$

Скольжение асинхронного двигателя при номинальной нагрузке обычно составляет 3–7 %. При увеличении нагрузки скольжение увеличивается и двигатель может остановиться.

Вращающий момент M асинхронного двигателя создается благодаря взаимодействию магнитного потока поля статора Φ с индуцированным в обмотке ротора током I_2 , поэтому величина его пропорциональна произведению $I_2 \Phi$.

Так как в механическую работу на валу двигателя может превращаться только активная мощность,

то вращающий момент будет создаваться активной составляющей тока, равной $I_1 \cos \varphi_1$, где φ_1 — угол сдвига фаз между током и ЭДС ротора. В окончательном виде выражение для вращающего момента имеет вид

$$M = c \Phi I_1 \cos \varphi_1, \quad (8.3)$$

где c — коэффициент, зависящий от конструктивных данных двигателя.

Двигатель будет работать устойчиво, с постоянной скоростью ротора при равновесии моментов, т.е. тогда, когда вращающий момент $M_{\text{в}}$ равен тормозному моменту на валу двигателя $M_{\text{тос}}$:

$$M_{\text{в}} = M_{\text{тос}}. \quad (8.4)$$

Любой нагрузке машины соответствует определенное число оборотов ротора n_2 и определенное скольжение s .

Магнитное поле статора вращается относительно ротора со скоростью $n_1 - n_2$ и индуцирует в его обмотке ЭДС E_2 , под действием которой по замкнутой обмотке ротора протекает ток I_2 .

Если нагрузка на валу двигателя увеличилась, т.е. увеличился тормозной момент, то равновесие моментов будет нарушено. Это приведет к уменьшению числа оборотов ротора, т.е. к увеличению скольжения. С увеличением скольжения магнитное поле статора чаще пересекает проводники обмотки ротора и индуцированная в обмотке ротора ЭДС E_2 возрастает, а следовательно, увеличивается ток в роторе и развиваемый двигателем вращающий момент. Увеличение скольжения и тока в роторе будет происходить до тех пор, пока не наступит равновесие моментов, т.е. вращающий момент не станет равен тормозному.

Аналогично протекает процесс изменения числа оборотов ротора и развиваемого момента при умень-

шении нагрузки двигателя. При уменьшении нагрузки на валу двигателя тормозной момент станет меньше вращающего, что приведет к увеличению числа оборотов ротора, т.е. к уменьшению скольжения. С уменьшением скольжения уменьшаются ЭДС и ток в обмотке ротора и, следовательно, вращающий момент уменьшается до значения, равного тормозному.

8.5. Асинхронный двигатель с фазным ротором

Недостатком асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором является большой пусковой ток, который превышает номинальный ток в 5–7 раз.

Желая улучшить пусковые характеристики асинхронного двигателя, М. О. Доливо-Добровольский разработал двигатель с фазным ротором.

Асинхронный двигатель с фазным ротором имеет обычный для асинхронных двигателей статор с трехфазной сетевой обмоткой, но на поверхности ротора также находится трехфазная обмотка. Три фазные обмотки ротора соединяются на самом роторе звездой, а свободные их концы соединяются с тремя изолированными друг от друга контактными кольцами, укрепленными на валу машины и изолированными от него (рис. 8.6). Поэтому асинхронный двигатель с фазным ротором называют также асинхронным двигателем с контактными кольцами.

Контактные кольца соприкасаются со щетками, установленными в неподвижных щеткодержателях. Через кольца и щетки обмотка ротора замыкается на пусковой трехфазный реостат, который изменяет активное сопротивление обмотки ротора в момент пуска. Обмотка статора такого двигателя включается непосредственно в трехфазную сеть (рис.8.7).



Рис. 8.6

Эта система используется либо для пуска (для уменьшения пускового тока при одновременном сохранении вращающего момента), либо для регулирования скорости вращения ротора двигателя. После разгона ротора пусковой реостат выключается, и обмотка закорачивается с помощью специального центробежного автоматического замыкателя. Для уменьшения потерь на трение в некоторых двигателях с фазным ротором имеются приспособления для отвода щеток от контактных колец после их замыкания.

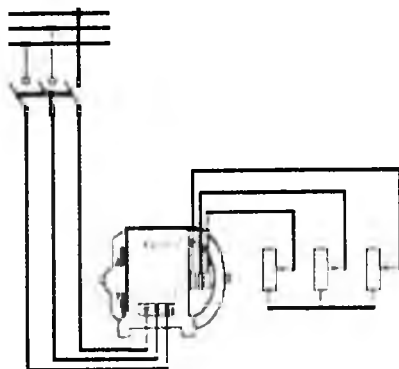


Рис. 8.7

Одним из важнейших достоинств асинхронного двигателя с фазным ротором является то, что в момент пуска создается большой вращающий момент при значительно меньших, чем у короткозамкнутых двигателей, пусковых токах. Объясняется это тем, что асинхронный двигатель при пуске развивает максимальный вращающий момент тогда, когда активное сопротивление ротора будет равно индуктивному сопротивлению двигателя. А так как у двигателей с фазным ротором активное сопротивление ротора можно изменять с помощью пускового реостата, то и пусковые характеристики их значительно лучше, чем у двигателей с короткозамкнутым ротором.

Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором производится следующим образом. Пусковой реостат устанавливается на холостую клемму (цепь ротора разомкнута), а на статор подается сетевое напряжение. Затем включается пусковой реостат, и его сопротивление постепенно уменьшают и делают равным нулю, когда двигатель приобретет номинальную скорость. Пусковой ток двигателя с фазным ротором превышает номинальный всего в 1,5–2 раза. Кроме того, включение в цепь ротора пускового реостата значительно увеличивает вращающий момент.

Сущность процесса регулирования скорости асинхронного двигателя с фазным ротором при помощи регулировочного реостата сводится к следующему. Ротор двигателя обладает определенной инерцией, и поэтому сразу после введения реостата его скорость и индуцируемая в роторе ЭДС E_2 в начальный момент остаются неизменными. Увеличение сопротивления пускового реостата в цепи ротора вызывает уменьшение тока ротора I_2 , что приводит к уменьшению вращающего момента (см. формулу (8.3)). Вследствие этого скорость вращения ротора n_2 нач-

нет уменьшаться. Уменьшение скорости n_2 аналогично увеличению скольжения s , вследствие чего индуцируемая в роторе ЭДС E_2 , пропорциональная s , также начнет расти, вызывая увеличение тока ротора I_2 . Рост тока I_2 и уменьшение скорости вращения ротора n_2 будет продолжаться до тех пор, пока ток I_2 не достигнет своего прежнего значения. В этом случае вращающий момент снова станет равным статическому, и двигатель начнет вращаться с постоянной скоростью, величина которой будет уже несколько меньше, чем до введения реостата. Регулировка скорости асинхронного двигателя с фазным ротором может осуществляться только в сторону уменьшения оборотов.

8.6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочими характеристиками называют зависимости мощности, потребляемой двигателем P_1 , потребляемого тока I , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$, скорости вращения двигателя n_2 , к.п.д. $\eta = P_2 / P_1$ и вращающего момента M от полезной мощности двигателя, отдаваемой на валу P_2 . Рабочие характеристики определяют основные эксплуатационные свойства асинхронного двигателя.

Рабочие характеристики асинхронного двигателя средней мощности показаны на рис. 8.8.

Их поведение объясняется следующим образом.

При малых нагрузках потребляемый двигателем ток I (ток холостого хода) может составлять от 20 до 70 % номинального тока. При увеличении нагрузки возрастает ток в цепи ротора, что приводит к почти пропорциональному увеличению тока I в цепи статора.

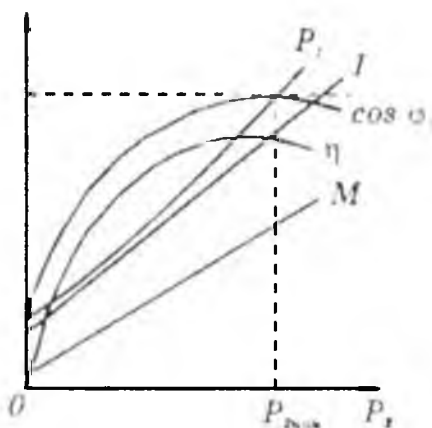


Рис. 8.8

Вращающий момент двигателя ($M = c \Phi I_2 \cos \varphi_2$) также почти пропорционален нагрузке, но при больших нагрузках линейность графика $M = f(P_2)$ несколько нарушается за счет уменьшения скорости вращения двигателя.

Рабочая характеристика $\cos \varphi_1 = f(P_2)$ выражает зависимость между развиваемой двигателем мощностью и фазовым сдвигом между током и напряжением статора. Асинхронный двигатель, как и трансформатор, потребляет из сети ток I , значительно отстающий по фазе от приложенного напряжения. Например, в режиме холостого хода $\cos \varphi_1 < 0,2$. При увеличении нагрузки на валу двигателя растут активные составляющие токов ротора и статора, увеличивая $\cos \varphi_1$. Максимального значения $\cos \varphi_1$ достигает при $P_2 \approx P_{2ном}$. При дальнейшем увеличении P_2 величина $\cos \varphi_1$ будет несколько уменьшаться. Это объясняется увеличением скольжения s , что вызывает повышение реактивного сопротивления обмотки ротора, а следо-

вательно, и фазового сдвига φ_2 . С увеличением φ_2 увеличивается и φ_1 , т.е. $\cos \varphi_1$ будет уменьшаться.

Поведение рабочей характеристики $\eta = f(P_2)$ объясняется следующим образом. Величина к.п.д. определяется отношением полезной мощности P_2 к мощности P_1 , потребляемой из сети. Величина $\Delta P = P_2 - P_1$ называется мощностью потерь. Кроме потерь в стали статора и ротора на перемагничивание и вихревые токи $P_{ст}$, которые вместе с механическими потерями $P_{мех}$ можно считать постоянными, в асинхронном двигателе существуют потери в меди P_M , т.е. в обмотках статора и ротора, которые пропорциональны квадрату протекающего тока и, следовательно, зависят от нагрузки. При холостом ходе, как и в трансформаторе, преобладают потери в стали, поскольку $I_2 \approx 0$, а I_1 равен току холостого хода I_0 , который невелик. При небольших нагрузках на валу потери в меди все же остаются небольшими, и поэтому к.п.д., определяемый формулой

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{ст} + P_M + P_{мех}} \quad (8.5)$$

с увеличением P_2 сначала резко возрастает. Когда постоянные потери $P_{ст} + P_{мех}$ станут равны потерям, зависящим от нагрузки P_M , к.п.д. достигает своего максимального значения. При дальнейшем увеличении нагрузки переменные потери мощности P_M значительно возрастают, в результате чего к.п.д. заметно уменьшается.

Характер зависимости $P_1 = f(P_2)$ может быть объяснен из соотношения $P_1 = P_2 / \eta$. Если бы к.п.д. был постоянен, то между P_1 и P_2 была бы линейная зависимость. Но поскольку к.п.д. зависит от P_2 и эта зависимость вначале резко возрастает, а при дальнейшем увеличении нагрузки изме-

няется незначительно, то и кривая $P_1 = f(P_2)$ сначала растет медленно, а затем резко возрастает.

8.7. Пуск и реверсирование асинхронных двигателей

Самым простым способом пуска асинхронных двигателей является прямое включение их в сеть. Однако при этом в момент пуска в цепи двигателя возникает большой пусковой ток, который значительно превышает номинальный. В маломощной сети этот ток может вызвать кратковременное понижение напряжения, что отражается на работе других потребителей энергии, включенных в эту сеть. Поэтому непосредственным включением в сеть запускают только двигатели малой мощности. При запуске двигателя большой мощности необходимо уменьшить пусковой ток. Для уменьшения пускового тока используют ряд способов. Рассмотрим некоторые из них.

Запуск двигателей с фазным ротором.

Запуск двигателя с фазным ротором уже был кратко рассмотрен в разд. 8.5, а применяемая для этого схема включения изображена на рис. 8.7. Двигатели данного типа обладают очень хорошими пусковыми характеристиками. Для уменьшения пускового тока обмотка ротора замыкается на пусковой реостат. При включении реостата в цепь обмотки ротора ток в этой обмотке уменьшается, а следовательно, уменьшается и ток в обмотке статора, а также ток, потребляемый двигателем от сети. Кроме того, при включении активного сопротивления в цепь обмотки ротора увеличивается $\cos \varphi_1$, а следовательно, и вращающий момент, развиваемый двигателем при запуске. Таким образом, при включении активного сопротивления в цепь ротора умень-

пается пусковой ток и увеличивается пусковой момент. После достижения ротором нормальной скорости реостат полностью выводится, т.е. обмотка ротора замыкается накоротко.

Запуск двигателей с короткозамкнутым ротором.

Для уменьшения пускового тока можно на время понизить напряжение на зажимах статора, включив для этого последовательно с его обмоткой трехфазное индуктивное сопротивление (рис. 8.9).

При пуске замыкается рубильник P_1 , и к обмоткам статора последовательно подключаются индуктивности. Это значительно уменьшает пусковой ток.

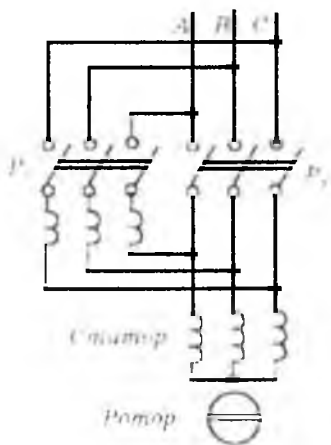


Рис. 8.9

Когда скорость двигателя приближается к номинальной, замыкается рубильник P_2 — он закорачивает катушки индуктивности, и статор включается на полное напряжение сети. Уменьшение пускового тока, вызванное понижением напряжения на статоре, вызывает уменьшение пускового момента

пропорционального квадрату напряжения на статоре. Например, при таком пуске уменьшение пускового тока в 2 раза будет сопровождаться уменьшением пускового момента в 4 раза. Для понижения напряжения на статоре вместо индуктивных сопротивлений можно использовать активные сопротивления реостатов, но это менее выгодно, так как связано с дополнительными потерями энергии в реостатах.

Мощные двигатели часто запускают с помощью автотрансформатора (рис. 8.10).

Благодаря автотрансформатору фазное напряжение двигателя U и пусковой ток $I_{\text{п.д}}$ при пуске уменьшаются пропорционально коэффициенту трансформации k , но пусковой ток в сети меньше пускового тока двигателя в k раз, т.е. ток двигателя

$$I_{\text{п.д}} = \frac{U}{kz},$$

а ток в сети

$$I_{\text{с}} = \frac{I_{\text{п.д}}}{k} = \frac{U}{k^2 z},$$

где z — сопротивление фазы двигателя, а U — фазное напряжение сети.

Следовательно, понижение напряжения автотрансформатором в k раз уменьшает пусковой ток в сети в k^2 раз. В то же время пусковой момент, пропорциональный квадрату напряжения, уменьшается в k^2 раз. Таким образом, благодаря применению автотрансформатора начальный вращающий момент уменьшается пропорционально линейному пусковому току, тогда как при поглощении части напряжения сопротивлением момент уменьшается пропорционально квадрату пускового тока.

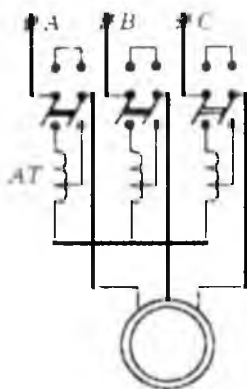


Рис. 8.10

Например, при понижении напряжения автотрансформатором в $\sqrt{2}$ раз пусковой ток сети понизится в 2 раза и в 2 раза понизится пусковой момент.

Понижение напряжения на статоре на время пуска можно осуществить также посредством временного переключения обмоток статора, нормально работающих при соединении треугольником, на соединение звездой. При пуске обмотки статора соединяются звездой, благодаря чему фазное напряжение уменьшается в $\sqrt{3}$ раз. Во столько же раз уменьшается и фазный пусковой ток:

$$I_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3z}},$$

где z — полное сопротивление фазы двигателя, а $U_{\text{л}}$ — линейное напряжение сети.

Так как линейный ток звезды равен фазному, то

$$I_{\text{л.зв}} = I_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3z}}$$

Если бы обмотки были соединены треугольником, то линейный ток был бы равен:

$$I_{л.тр} = \sqrt{3}I_n = \sqrt{3} \frac{U_n}{z}$$

Таким образом, переключение на звезду уменьшает пусковой линейный ток в 3 раза:

$$\frac{I_{л.тр}}{I_{л.з}} = 3$$

Практически такое переключение выполняется с помощью простого трехполюсного переключателя (рис. 8.11).

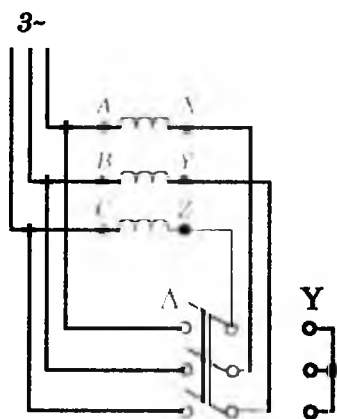


Рис. 8.11

Этот способ запуска может быть применен для двигателя, обмотки статора которого при питании от сети данного напряжения нормально должны быть соединены треугольником.

Общим недостатком способов запуска асинхронных двигателей понижением напряжения на стато-

ре и переключением обмоток статора со звезды на треугольник является значительное снижение пускового момента, который пропорционален квадрату фазного напряжения. Поэтому все эти способы запуска можно использовать только в тех случаях, когда двигатель запускается не под полной нагрузкой.

Реверсирование – это изменение направления вращения ротора двигателя. Как известно, направление вращения ротора зависит от направления вращения магнитного поля статора, поэтому для изменения направления вращения ротора следует изменить последовательность фаз (см. разд. 8.3). На практике это осуществляется путем перемены мест любых двух фаз. Для этого часто используют трехполюсные переключатели (рис. 8.12):

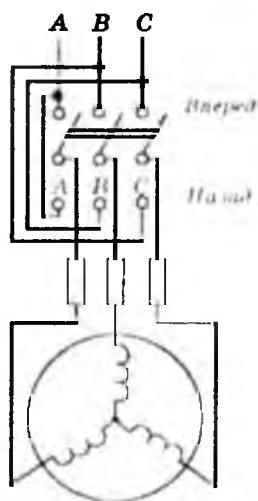


Рис. 8.12

8.8. Однофазный асинхронный двигатель

В быту и в технике, там, где нужны двигатели небольшой мощности, часто используются так называемые однофазные асинхронные двигатели. Однофазный двигатель отличается от трехфазного тем, что его статор имеет одну обмотку (иногда две) и питается от однофазной сети. Ротор этих двигателей ввиду их малой мощности всегда выполняется короткозамкнутым в виде беличьего колеса и ничем не отличается от ротора трехфазного двигателя.

Если обмотку однофазного двигателя включить в сеть, то протекающий по ней переменный ток будет возбуждать в машине, пока ее ротор неподвижен, переменное магнитное поле, ось которого тоже неподвижна. Это поле будет индуцировать в обмотке ротора токи, взаимодействие которых с магнитным полем приведет к возникновению сил, противоположно направленных в правой и левой половинах ротора, вследствие чего результирующий момент, действующий на ротор, окажется равным нулю. Следовательно, при наличии одной обмотки начальный пусковой момент однофазного двигателя равен нулю, т.е. такой двигатель самостоятельно не сможет тронуться с места. Однако, если с помощью какой-либо внешней силы сообщить ротору некоторую скорость вращения, то он начнет вращаться.

Это явление можно объяснить на основе того, что переменное пульсирующее магнитное поле можно рассматривать как векторную сумму двух магнитных полей, вращающихся в противоположные стороны с одинаковой угловой скоростью ω . Амплитуды магнитной индукции обоих этих полей — B_{1m} и B_{2m} — одинаковы и равны половине амплитуды магнитной индукции пульсирующего переменного магнитного поля машины:

$$B_{1m} = B_{2m} = B_m / 2.$$

Предположим, что индукция пульсирующего переменного магнитного поля пропорциональна току и изменяется по закону:

$$B = B_m \sin \omega t.$$

Простое графическое построение (рис. 8.13) показывает, как в результате сложения двух одинаковых по длине векторов, вращающихся в противоположные стороны, получается синусоидально изменяющийся вектор.

Покажем это аналитически. Пусть в некоторой точке O имеются два вектора магнитной индукции

B_1 и B_2 ($B_1 = B_2 = \frac{B_m}{2}$), вращающиеся в противоположных направлениях.

положных направлениях.

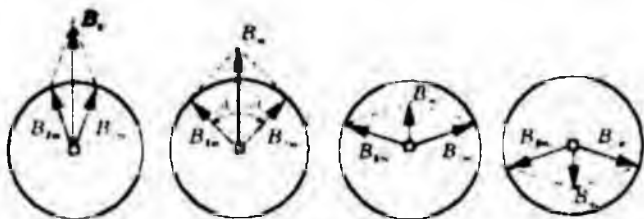


Рис. 8.13

Из рисунка мы видим, что суммарное значение индукции B в точке O равно сумме проекций векторов B_1 и B_2 на ось Oy :

$$B = B_1 \sin \omega t + B_2 \sin \omega t = B_m \sin \omega t. \quad (8.6)$$

Таким образом, на ротор действуют два вращающихся магнитных потока: Φ_1 — вращающийся в сторону вращения ротора и называемый *прямым потоком* и Φ_2 — вращающийся навстречу ротору и называемый *обратным потоком*.

Прямой поток Φ_1 вращается относительно ротора с небольшой скоростью $(n_1 - n_2)$ и индуцирует в обмотке ротора ЭДС и ток небольшой частоты (например, при $s = 0,02$ частота тока $f_1 = fs = 50 \cdot 0,02 = 1 \text{ Гц}$). Вращающийся момент, создаваемый этим потоком,

$$M_1 = cI_1\Phi_1 \cos \psi_1. \quad (8.7)$$

Этот момент довольно велик, так как для тока небольшой частоты обмотка ротора является почти чисто активным сопротивлением, и поток Φ_1 и индуцируемый им ток I_1 почти совпадают по фазе, т.е. значение $\cos \psi_1$ близко к единице, а значение тока I_1 определяется активным сопротивлением обмотки.

Обратный поток Φ_2 вращается относительно ротора с большой скоростью $(n_1 + n_2)$ и индуцирует в обмотке ротора ЭДС и ток I_2 с частотой, почти вдвое большей частоты питающего тока (например, при $s = 0,02$ частота индуцируемого тока $f_2 = (2 - s)f_1 = (2 - 0,02) \cdot 50 = 99 \text{ Гц}$). Вращающийся момент, создаваемый обратным потоком,

$$M_2 = cI_2\Phi_2 \cos \psi_2. \quad (8.8)$$

Этот момент довольно мал, так как для тока большой частоты обмотка ротора обладает большим индуктивным сопротивлением ($x_2 = \omega L$), поэтому между током I_2 и потоком Φ_2 будет большой сдвиг по фазе и $\cos \psi_2$ будет мал, как и величина тока I_2 , который определяется активным и большим индуктивным сопротивлениями обмотки. Таким образом, вращение ротора может поддерживаться вращающим моментом прямого потока M_1 .

Пуск в ход однофазных двигателей осуществляется с помощью того или иного пускового устройства. Работа этих устройств основана на использовании свойства двух магнитных потоков, смещенных в пространстве на 90° и сдвинутых по фазе на $\pi/2$, создавать вращающее магнитное поле.

8.8.1. Однофазные двигатели с пусковой обмоткой

На статоре такого двигателя кроме *рабочей обмотки РО* находится так называемая *пусковая обмотка ПО*, повернутая в пространстве относительно рабочей обмотки на 90° (рис. 8.14).

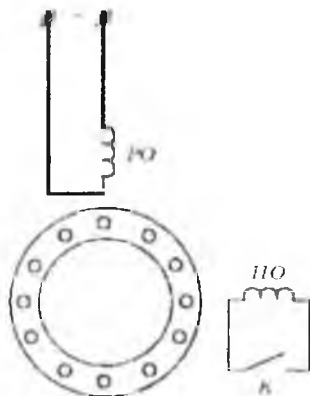


Рис. 8.14

В момент пуска пусковая обмотка замыкается кнопкой *К*, и в результате трансформаторной связи в ней возникает ток, сдвинутый по фазе относительно питающего тока почти на $\pi / 2$. Эти токи создают вращающее магнитное поле, которое и разгоняет ротор. После разгона пусковая обмотка размыкается и в дальнейшей работе двигателя не участвует. Двигатели с таким пуском встречаются иногда в бытовых стиральных машинах.

8.8.2. Конденсаторные двигатели

В этих двигателях рабочая и пусковая обмотки статора также смещены на статоре друг относительно друга на 90° . На время пуска пусковую обмотку

ПО подключают к сети с помощью кнопки K через конденсатор C (рис. 8.15), благодаря которому ток в пусковой обмотке отличается по фазе от тока в рабочей обмотке на $\pi / 2$, чем и обеспечивается разгон ротора.

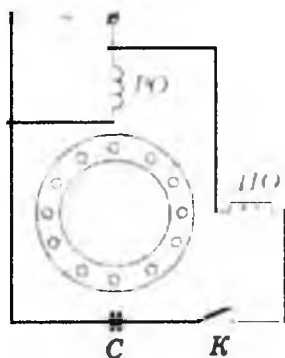


Рис. 8.15

В некоторых двигателях используются два параллельно включенных конденсатора C_1 и C_2 — оба используются при запуске, а один из них (C_2) остается включенным и во время работы двигателя, благодаря чему обе обмотки являются рабочими (рис. 8.16).

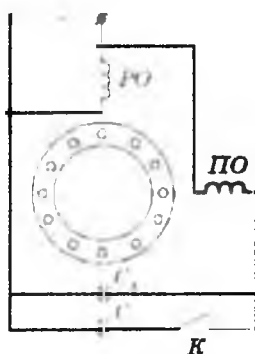


Рис. 8.16

Конденсаторные двигатели имеют лучшие пусковые и рабочие характеристики по сравнению с другими однофазными двигателями, поэтому они получили наиболее широкое распространение.

8.8.3. Однофазные двигатели с расщепленными полюсами

Статор двигателей очень малой мощности часто делают с явно выраженными полюсами, причем каждый полюс разрезан, а на одну его часть надето медное кольцо, играющее роль пусковой обмотки (рис. 8.17). Под действием переменного магнитного потока, создаваемого обмоткой статора, в кольце индуцируется ЭДС, отстающая по фазе от потока на $\pi / 2$. Эта ЭДС создает в кольце ток. Поскольку сопротивление кольца практически чисто активное, этот ток совпадает по фазе с ЭДС и отстает от потока обмотки тоже на $\pi / 2$.

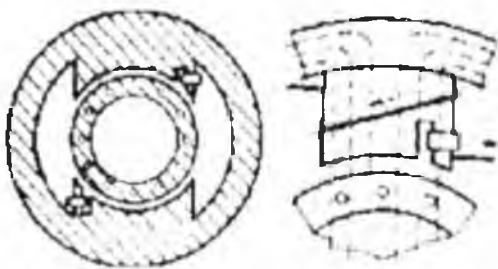


Рис. 8.17

Этот ток в кольце создает свой магнитный поток, совпадающий с ним по фазе. Таким образом, под полюсом действуют два сдвинутых по фазе на $\pi / 2$ магнитных потока, образуя вращающееся магнитное поле. Это магнитное поле и увлекает за собой короткозамкнутый ротор.

Двигатели с расщепленными полюсами широко применяются для малоомощного привода (кинопроекторы, вентиляторы и т.п.).

8.8.4. Включение трехфазных двигателей в однофазную сеть

Во многих случаях трехфазные асинхронные двигатели можно включать в однофазную сеть переменного тока.

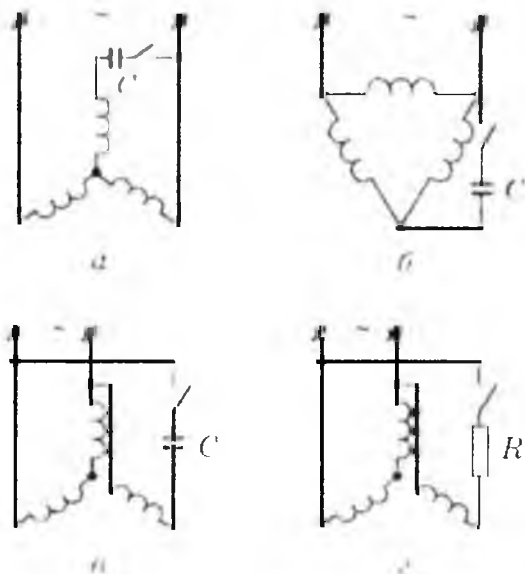


Рис. 8.18

На рис. 8.18, а, б показаны схемы включения трехфазных двигателей, у которых выведены лишь по три конца обмоток. Конденсатор C создает дополнительный сдвиг по фазе между током и напряжением, обеспечивая начальный пусковой момент. Величина этого конденсатора рассчитывается или

подбирается так, чтобы обеспечить примерное равенство всех трех фазных токов. На рис. 8.18 в, г показаны схемы включения трехфазных асинхронных двигателей, у которых выведены все шесть концов статорной обмотки. Включение трехфазных двигателей в однофазную сеть позволяет получать от них лишь 40–50 % от их номинальной мощности в трехфазном режиме.

Вопросы для повторения

1. Как устроен трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором?
2. Каков принцип работы трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором?
3. Объясните создание вращающегося магнитного поля трехфазной обмоткой машины переменного тока.
4. От чего зависит скорость вращения n_1 вращающегося магнитного поля?
5. Что такое скольжение асинхронного двигателя?
6. Как производится реверсирование асинхронного двигателя?
7. Как устроен трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором?
8. Как производится пуск трехфазных асинхронных двигателей с фазным и короткозамкнутым ротором?
9. Как устроен однофазный асинхронный двигатель?
10. Каков принцип работы однофазного асинхронного двигателя?
11. Опишите способы пуска однофазных асинхронных двигателей.
12. Нарисуйте схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть.

Глава 9. Синхронные электрические машины переменного тока

9.1. Устройство и принцип работы синхронного генератора

Синхронными называются электрические машины, частота вращения которых связана постоянным соотношением с частотой сети переменного тока, в которую эта машина включена. Синхронные машины служат генераторами переменного тока на электрических станциях, а синхронные двигатели применяются в тех случаях, когда нужен двигатель, работающий с постоянной частотой вращения. Синхронные машины обратимы, т.е. они могут работать и как генераторы, и как двигатели, хотя в конструкциях современных синхронных генераторов и двигателей имеются небольшие, но практически весьма существенные отличия. Синхронная машина переходит от режима генератора к режиму двигателя в зависимости от того, действует ли на ее вал вращающая или тормозящая механическая сила. В первом случае она получает на валу механическую, а отдает в сеть электрическую энергию, а во втором случае она потребляет из сети электрическую энергию, а отдает на валу механическую энергию.

Синхронная машина имеет две основные части — ротор и статор, причем статор не отличается от статора асинхронной машины. Ротор синхронной машины представляет собой систему вращающихся электромагнитов, которые питаются постоянным током, поступающим в ротор через контактные кольца и щетки от внешнего источника. В обмотках статора под действием вращающегося магнитного поля ротора наводится ЭДС, которая подается на внешнюю цепь генератора (в режиме двигателя на обмотку статора подается напряжение сети). Такая конструкция генератора позволяет устранить скользящие контакты в цепи нагрузки генератора (обмотки статора непосредственно соединяются с нагрузкой) и надежно изолировать обмотки статора от корпуса машины, что существенно для мощных генераторов, работающих при высоких напряжениях.

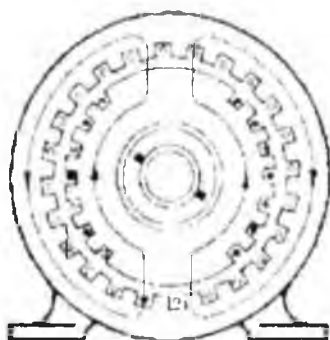
Основной магнитный поток синхронного генератора, создаваемый вращающимся ротором, возбуждается посторонним источником-возбудителем, которым обычно является генератор постоянного тока небольшой мощности, установленный на общем валу с синхронным генератором. Постоянный ток от возбудителя подается на ротор через щетки и контактные кольца, установленные на валу ротора.

По своей конструкции роторы бывают *явнополюсные* (рис. 9.1, а) и *неявнополюсные* (рис. 9.1, б). Число пар полюсов ротора обусловлено скоростью его вращения.

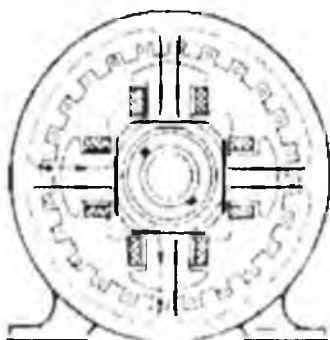
У многополюсной синхронной машины ротор имеет p пар полюсов, а токи в обмотке статора образуют также p пар полюсов вращающегося магнитного поля (как у асинхронной машины). Ротор должен вращаться с частотой вращения поля, следовательно, его синхронная скорость равна

$$n = \frac{60f}{p} \quad (9.1)$$

Для стандартной частоте переменного тока 50 Гц частота вращения двухполюсной машины ($p = 1$) 3000 об/мин . С такой частотой вращаются современные турбогенераторы, состоящие из паровой турбины и синхронного генератора большой мощности с неявнополюсным ротором, который имеет одну пару полюсов. Неявнополюсный ротор такого гене-



а



б

Рис. 9.1

ратора изготавливается из массивной стальнойковки. Обмотка постоянного тока расположена в пазах, выфрезерованных по всей его длине.

У гидрогенераторов первичным двигателем служит гидравлическая турбина, скорость вращения которой невелика (от 50 до 750 об/мин) и определяется высотой напора воды. В этом случае используются синхронные генераторы с явнополюсным ротором, имеющим от 4 до 60 пар полюсов.

Частота вращения дизель-генераторов, соединенных с первичным двигателем – дизелем, находится в пределах от 500 до 1500 об/мин. Обычно это явнополюсные машины небольшой мощности. В мало-мощных синхронных генераторах обычно используется *самовозбуждение*: обмотка возбуждения питается выпрямленным током того же генератора (рис. 9.2).

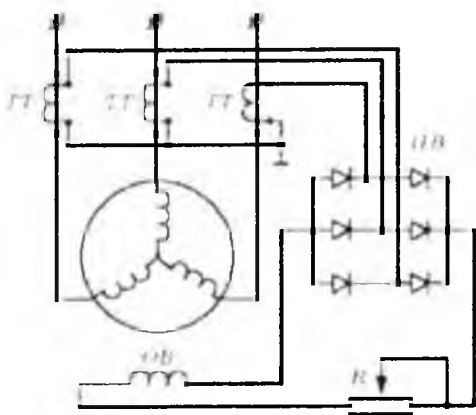


Рис. 9.2

Цепь возбуждения образуют трансформаторы тока *ТТ*, включенные в цепь нагрузки генератора, полупроводниковый выпрямитель, собранный по схеме

трехфазного моста, и обмотка возбуждения генератора OB с регулировочным реостатом R .

Самовозбуждение генератора происходит следующим образом. В момент пуска генератора благодаря остаточной индукции в магнитной системе появляются слабые ЭДС и токи в рабочей обмотке генератора. Это приводит к появлению ЭДС во вторичных обмотках трансформаторов $ТТ$ и небольшого тока в цепи возбуждения, усиливающего индукцию магнитного поля машины. ЭДС генератора возрастает до тех пор, пока магнитная система машины полностью не возбуждётся.

Среднее значение ЭДС, наводимое в каждой фазе обмотки статора,

$$E_{\text{ср}} = c n \Phi, \quad (9.2)$$

где n – скорость вращения ротора, Φ – максимальный магнитный поток, возбуждаемый в синхронной машине, а c – постоянный коэффициент, учитывающий конструктивные особенности данной машины.

Мы видим, что ЭДС генератора пропорциональна основному магнитному потоку машины, при этом напряжение на зажимах генератора меньше ЭДС на величину падения напряжения на обмотке:

$$U = \vec{E} - I z, \quad (9.3)$$

где I – ток в обмотке статора (ток нагрузки); z – полное сопротивление обмотки (одной фазы).

Для точной подгонки амплитуды ЭДС величину магнитного потока регулируют путем изменения тока в цепи возбуждения регулировочным реостатом. Форма ЭДС синхронного генератора должна быть синусоидальной. Синусоидальность ЭДС зависит прежде всего от распределения магнитной индукции в воздушном зазоре между статором и ротором. В явнополюсных машинах полюсным нако-

нечникам ротора придают определенную форму (делают скосы по краям). При этом воздушный зазор постепенно увеличивается от середины полюса к его краям, а магнитная индукция распределяется по закону косинуса.

Однако такой способ получения синусоидальной ЭДС неприменим для машин с неявнополюсным ротором. В неявнополюсных машинах нужного распределения магнитной индукции добиваются путем особого размещения обмотки возбуждения на поверхности ротора. Эти и другие меры обеспечивают практически синусоидальную форму ЭДС.

9.2. Реакция якоря

Для частей синхронной машины применяются те же наименования, что и для частей машин постоянного тока: якорем принято называть ту часть, в обмотке которой индуцируется ЭДС. Следовательно, в синхронных машинах основного типа с неподвижной обмоткой переменного тока статор служит якорем. Индуктором, т.е. той частью, которая возбуждает основной магнитный поток, в синхронной машине основного типа является ротор.

Магнитная система синхронного генератора в режиме холостого хода (без нагрузки) состоит из магнитного потока полюсов, который индуцирует ЭДС в обмотке статора. После включения нагрузки в трехфазной обмотке статора возникает ток, который, как известно, создает свое вращающееся магнитное поле. Скорость вращения этого поля равна скорости вращения магнитного поля полюсов. Следовательно, полный магнитный поток синхронной машины при нагрузке складывается из магнитных потоков ротора и статора. Магнитное поле статора, накладываясь на магнитное поле ротора, может либо ослаб-

лять, либо усиливать его. Результат взаимодействия этих полей определяется величиной и характером нагрузки. Влияние магнитного поля статора на магнитное поле, создаваемое вращающимися полюсами ротора, называется *реакцией якоря*.

Реакция якоря различна при различных нагрузках. В случае активной нагрузки (для получения такого режима нагрузка должна быть активно-емкостной, при этом емкость скомпенсирует индуктивность обмотки генератора) общий магнитный поток генератора несколько увеличивается и, следовательно, ЭДС генератора возрастает.

В случае чисто индуктивной нагрузки общий магнитный поток генератора уменьшается и, следовательно, уменьшается его ЭДС.

При емкостной нагрузке генератора общий магнитный поток генератора увеличивается, что приводит к увеличению ЭДС.

Отметим, что при увеличении тока нагрузки увеличивается магнитное поле якоря. Поэтому чем больше ток нагрузки, тем больше реакция якоря. Реакция якоря в синхронном генераторе приводит к изменению суммарного магнитного потока и ЭДС, что крайне нежелательно, поскольку изменение величины и характера нагрузки приведет к изменению напряжения на зажимах генератора.

Чтобы свести реакцию якоря к минимуму, увеличивают зазор между статором и ротором и одновременно увеличивают ток и число витков обмотки возбуждения. Это приводит к уменьшению потока якоря за счет увеличения магнитного сопротивления машины при неизменном общем магнитном потоке. Однако таким способом нельзя полностью устранить влияние реакции якоря. На практике при всяком изменении нагрузки с помощью автомати-

ческих устройств изменяют ток возбуждения, что существенно ослабляет влияние реакции якоря.

Явление реакции якоря относится и к синхронным двигателям, но поскольку в этих двигателях форма кривой ЭДС малосущественна, то реакция якоря в них имеет второстепенное значение.

9.3. Характеристики синхронного генератора

Основными характеристиками синхронного генератора являются характеристика холостого хода, а также внешняя и регулировочная характеристики.

Характеристика холостого хода

Эта характеристика представляет собой зависимость ЭДС генератора E_0 на холостом ходу (т.е. без нагрузки) от тока возбуждения I_0 . Она связана с кривой намагничивания стали и напоминает ее по форме (рис. 9.3).

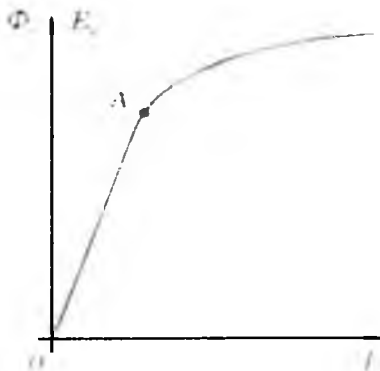


Рис. 9.3

На холостом ходу синхронного генератора его ЭДС создается только главным магнитным потоком, поэтому ЭДС E_0 пропорциональна главному магнитному потоку Φ_0 , который в свою очередь пропорционален магнитной индукции B_0 в статоре. Поэтому зависимость $E_0 = f(I_e)$ подобна зависимости $B_0 = f(I_e)$, т.е. первоначальной кривой намагничивания стали. При достижении области магнитного насыщения магнитной системы генератора скорость роста ЭДС уменьшается, а спрямление кривой при малых значениях индукции происходит за счет воздушного зазора в магнитной цепи машины, обладающего большим магнитным сопротивлением. Опытным путем эту характеристику получают, изменяя ток возбуждения при номинальной скорости вращения ротора.

Номинальный режим возбуждения генератора выбирают в области изгиба кривой (точка А). Использование области магнитного насыщения для увеличения ЭДС генератора приводит к неоправданному увеличению тока и размеров обмотки возбуждения.

Внешняя характеристика

Внешняя характеристика синхронного генератора характеризует его электрические свойства и представляет собой зависимость напряжения на зажимах генератора U от его тока нагрузки I при постоянных значениях коэффициента мощности $\cos \varphi$, скорости вращения ротора n и тока возбуждения I_e (рис. 9.4).

Чтобы экспериментально получить внешнюю характеристику, нужно сначала нагрузить генератор до номинального тока I_n при номинальном напряжении U_n на зажимах генератора, которое устанавливается путем регулировки тока возбуждения. За-

тем, поддерживая ток возбуждения и частоту вращения постоянными, постепенно уменьшают ток нагрузки до нуля. Внешние характеристики могут иметь спад (кривая 2) или подъем (кривая 3) в зависимости от характера нагрузки и действия реакции якоря. Номинальный режим нагрузки выбирают таким, чтобы при $\cos\varphi = 0,8$ изменения напряжения ΔU не превышали 35–45 % от номинального (кривая 1).

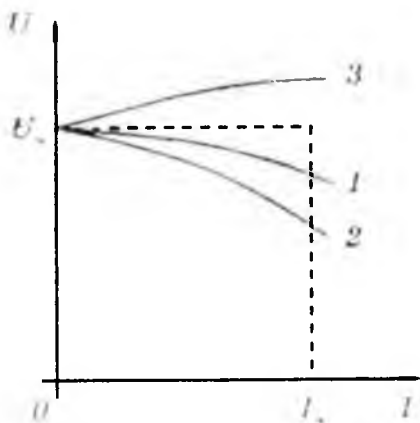


Рис. 9.4

Регулировочная характеристика

Регулировочная характеристика синхронного генератора представляет собой зависимость тока возбуждения генератора I_e от тока нагрузки I при $U = U_n = \text{const}$, $n = n_n = \text{const}$ и $\cos\varphi = \text{const}$.

Эта характеристика показывает, как выбрать ток возбуждения, при котором напряжение на зажимах генератора оставалось бы постоянным при изменениях нагрузки.

Чтобы экспериментально получить регулировочную характеристику, нужно сначала включить генератор и сообщить его ротору номинальную скорость вращения n_n при холостом ходе, а потом путем изменения тока возбуждения добиться получения номинального напряжения U_n .

Далее постепенно увеличивают ток нагрузки и снимают характеристику, добиваясь в каждой точке постоянства напряжения на зажимах машины ($U = U_n = const$) путем регулирования тока возбуждения.

На рис. 9.5 изображены регулировочные характеристики для различных значений $\cos \varphi$. Мы видим, что при активно-индуктивной нагрузке, когда $\varphi > 0$ (кривая 2), ток возбуждения необходимо увеличивать, а при активно-емкостной нагрузке, когда $\varphi < 0$ (кривая 3) — уменьшать. Кривая 1 соответствует оптимальному режиму. Все эти явления обусловлены реакцией якоря.

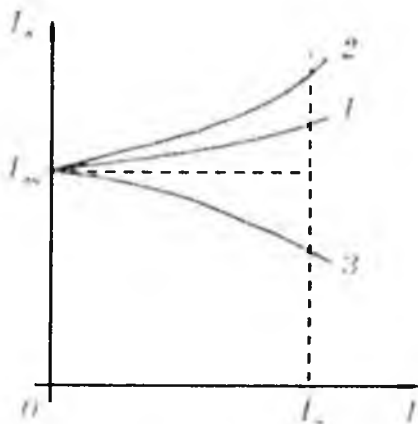


Рис. 9.5

Регулировочные характеристики имеют важное практическое значение, так как они определяют пре-

делу изменения тока возбуждения для поддержания номинального напряжения при изменении нагрузки.

9.4. Работа синхронной машины в режиме двигателя

Как и все электрические машины, синхронные машины обратимы. Синхронный двигатель по своей конструкции принципиально не отличается от синхронного генератора. В случае идеальной синхронизации ($U_c = E_s$ и $f_c = f_s$) подключенная к сети синхронная машина не отдает энергию в сеть и не потребляет ее от сети. Покрытие потерь в машине осуществляется за счет первичного двигателя. Изменение момента, приложенного к валу машины, приведет к изменению угла θ между полем ротора и суммарным магнитным полем машины, не нарушая при этом синхронную частоту вращения.

При идеальной синхронизации угол θ равен нулю. Для того чтобы заставить машину (генератор) отдавать энергию в сеть, надо увеличить вращающий момент со стороны первичного двигателя. Это приведет к увеличению угла θ между полем ротора и суммарным магнитным полем машины и к нарушению взаимной компенсации E_s и U_c . В результате появится уравнивающий ток, магнитный поток которого по правилу Ленца будет препятствовать вращению ротора. Другими словами, магнитный поток уравнивающего тока будет создавать противодействующий момент, на преодоление которого потребуется дополнительное увеличение вращательного момента первичного двигателя. В этом случае вращающееся магнитное поле ротора будет вести за собой поле статора, а электромагнитные силы играют роль упругой связи между двумя полями. Гене-

ратор начнет отдавать энергию в сеть. Максимум отдаваемой генератором мощности будет при значении угла θ , равном 90° .

Если же величину вращающего момента со стороны первичного двигателя уменьшать, то угол θ начнет уменьшаться, и при полном отключении первичного двигателя ротор вместе со своим магнитным полем несколько отстанет от вращающегося поля статора (угол θ станет отрицательным). Вращающееся поле статора поведет за собой ротор, являющийся электромагнитом. Синхронная машина превращается в синхронный двигатель, в котором и поле статора и поле ротора (ротор) будут вращаться с одинаковой скоростью, т.е. синхронно. По мере увеличения нагрузки на валу такого двигателя угол θ будет увеличиваться по модулю, оставаясь отрицательным. Это также приведет к увеличению тока в цепи двигателя и, следовательно, к увеличению потребляемой из сети электрической мощности. В отличие от асинхронного двигателя, в котором увеличение нагрузки на валу приводит к уменьшению скорости вращения ротора, в синхронном двигателе увеличение механической нагрузки приводит к увеличению угла θ между полюсами вращающихся полей статора и ротора при сохранении скорости вращения ротора.

Ротор синхронного двигателя будет продолжать синхронное вращение до тех пор, пока он будет за полпериода переменного тока успевать поворачиваться своими полюсами к следующим проводникам обмотки статора с таким же направлением тока, как и в тех проводниках, против которых он находится в данный момент. Другими словами, ротор двигателя должен вращаться с такой же скоростью, что и поле статора, проходя полюс за полпериода переменного тока (разность скоростей поля и ротора

может составлять не более 2–5 %), при этом на него будет действовать вращающий момент одного и того же направления. При слишком большой механической нагрузке ротор двигателя выпадает из синхронизма и двигатель останавливается.

9.5. Пуск и остановка синхронного двигателя

Синхронный двигатель не может быть запущен простым включением в сеть, поскольку его вращающий момент при пуске равен нулю. Это можно объяснить следующим образом. Пусть в момент включения двигателя направление питающего тока в обмотках статора соответствует рис. 9.6, а. В этот момент на неподвижный ротор будет действовать пара сил F , стремящихся повернуть его по часовой стрелке. Через полпериода направление тока в обмотках статора изменится на противоположное (рис. 9.6, б). Так как ротор в силу своей инерции за это очень короткое время практически остается на месте, то на него теперь будет действовать такая же пара сил F_1 , стремящаяся повернуть ротор в обратную сторону. Таким образом, при непосредственном включении синхронного двигателя в сеть его ротор не сдвинется с места. Как уже говорилось в предыдущем разделе, за полпериода переменного тока ротор должен повернуться к следующему полюсу статора (при одной паре полюсов обмотки статора – на пол-оборота), и, следовательно, для этого его надо тем или иным способом разогнать до скорости вращения, близкой к синхронной. Таким образом, характерной особенностью синхронного двигателя является необходимость предварительного разгона ротора.

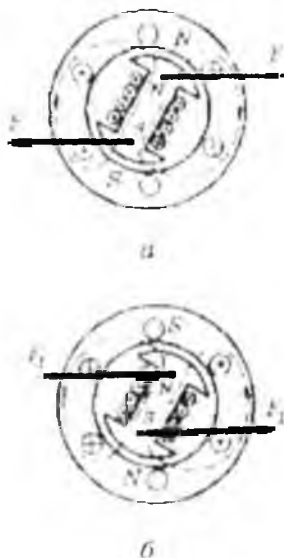


Рис. 9.6

В прошлом для раскручивания ненагруженного синхронного двигателя применялся специальный разгонный асинхронный двигатель небольшой мощности. Сначала ротор разгонялся до скорости, близкой к синхронной, потом включалась обмотка возбуждения, а затем обмотки статора включались в сеть и синхронный двигатель синхронизировался с сетью как генератор при включении на параллельную работу.

В настоящее время синхронные двигатели запускают с помощью асинхронного пуска. Для этого применяется специальная конструкция ротора. В полюсных наконечниках ротора укладываются металлические стержни, соединенные с боков кольцами. Получается дополнительная (пусковая) обмотка, подобная «белчьему колесу» асинхронного двигателя. При пуске такого двигателя обмотку воз-

буждения закорачивают через активное сопротивление, превышающее активное сопротивление обмотки возбуждения в 10–15 раз, а обмотку статора включают в сеть (в случае двигателей большой мощности через пусковой автотрансформатор или через индуктивные сопротивления). При этом ротор начинает разгоняться так же, как и ротор асинхронного двигателя. После того, как он достигнет наибольшей возможной скорости вращения (примерно 95 % синхронной), обмотку возбуждения подключают к источнику постоянного тока. Двигатель автоматически входит в синхронизм, а дополнительная обмотка в полюсных наконечниках как бы автоматически отключается, поскольку при синхронной скорости вращения поля и ротора ЭДС в ней равна нулю. Для получения большого пускового момента пусковую обмотку (стержни в полюсных наконечниках) изготавливают с большим активным сопротивлением. Закорачивание обмотки возбуждения при асинхронном пуске синхронного двигателя необходимо потому, что вращающееся поле может индуцировать в разомкнутой обмотке возбуждения значительную ЭДС, которая может пробить ее изоляцию. Нельзя также замыкать обмотку возбуждения накоротко, так как в ней возникает значительный однофазный ток, который будет тормозить ротор по достижении им половины синхронной скорости вращения.

Для остановки синхронного двигателя сначала уменьшают ток возбуждения до значения, соответствующего минимальному току обмоток статора, затем отключают статор и лишь после этого замыкают цепь возбуждения. Несоблюдение такого порядка (например, отключение обмотки возбуждения раньше отключения обмоток статора) приведет к чрезмерному увеличению тока в обмотке статора и

к опасным для целостности изоляции перенапряжениям в разомкнутой обмотке возбуждения.

Достоинством синхронного двигателя является строго постоянная скорость вращения, а недостатком – необходимость применения вспомогательных автоматических устройств для пуска и остановки двигателя.

9.6. Характеристики синхронного двигателя

Рабочими характеристиками синхронного двигателя являются зависимости потребляемой мощности P_1 , потребляемого тока I_1 , вращающего момента M , $\cos \varphi$ и к.п.д. η от полезной мощности нагрузки P_2 . Они изображены на рис. 9.7 и соответствуют случаю, когда на холостом ходу $\cos \varphi = 1$.

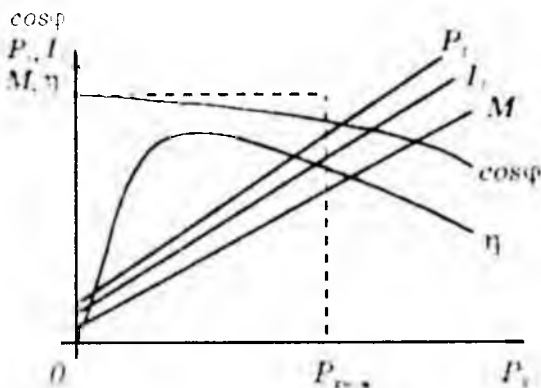


Рис. 9.7

При постоянном токе возбуждения увеличение нагрузки на валу двигателя вызывает уменьшение $\cos \varphi$, что объясняется увеличением реактивного

падения напряжения при возрастании потребляемого от сети тока I_1 . Коэффициент полезного действия η с увеличением нагрузки быстро увеличивается и достигает максимума, когда не зависящие от нагрузки механические потери и потери в стали становятся равными зависящим от нагрузки потерям в меди обмоток.

Дальнейшее увеличение нагрузки снижает к.п.д. Потребляемый статором ток I_1 на холостом ходу мал и при $\cos\varphi = 1$. При увеличении нагрузки ток I_1 возрастает практически пропорционально нагрузке. Вращающий момент M , развиваемый двигателем, на холостом ходу мал, поскольку механические потери невелики. При увеличении нагрузки, благодаря постоянству скорости вращения синхронного двигателя, вращающий момент возрастает почти линейно. Потребляемая двигателем мощность P_1 растет быстрее, чем полезная P_2 , так как при увеличении нагрузки сказывается увеличение электрических потерь в двигателе, которые пропорциональны квадрату тока.

Вопросы для повторения

1. Как устроен трехфазный синхронный генератор?
2. Каков принцип работы трехфазного синхронного генератора?
3. Какие конструкции роторов используются в трехфазных синхронных генераторах?
4. Как осуществляется самовозбуждение трехфазного синхронного генератора?
5. Как зависит напряжение на зажимах синхронного генератора от нагрузки?
6. Что такое реакция якоря?
7. Перечислите и изобразите характеристики трехфазного синхронного генератора.

-
8. *Опишите работу синхронной машины в режиме двигателя.*
 9. *Как осуществляются асинхронный пуск и остановка синхронного двигателя?*
 10. *Перечислите и изобразите характеристики трехфазного синхронного двигателя.*

Глава 10. Электрические машины постоянного тока

10.1. Общие сведения

Электрическим машинам постоянного тока присущи многие полезные качества. Двигатели постоянного тока допускают плавное регулирование скорости вращения в широких пределах, создавая при этом большой пусковой момент. Поэтому эти двигатели незаменимы в качестве тяговых двигателей трамваев, троллейбусов, метро и электровозов. Двигатели постоянного тока также широко используются в промышленности.

Генераторы постоянного тока используются для питания электролитических ванн, электромагнитов различного назначения и т.п. Генераторы постоянного тока, как правило, приводятся в действие асинхронными и синхронными двигателями переменного тока.

10.2. Устройство и принцип работы генератора постоянного тока

Принцип работы генератора постоянного тока основан на возникновении ЭДС в рамке, вращающейся в магнитном поле (рис. 10.1, а).

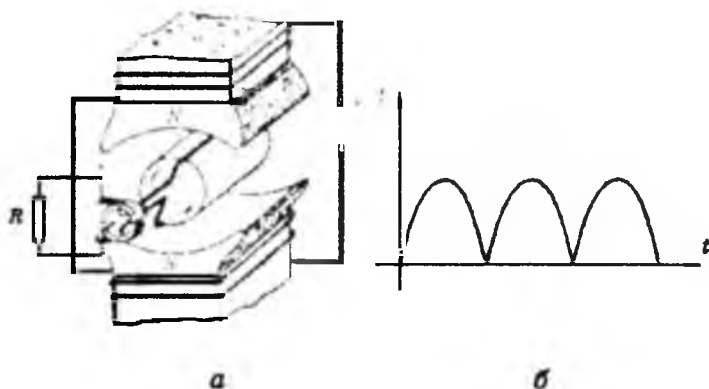


Рис. 10.1

Как известно, при вращении рамки индуцируемая в ней ЭДС будет изменяться по синусоиде, т.е. за один оборот дважды поменяет знак. Чтобы ток во внешней цепи имел одно направление (постоянное), применяют коллектор — два полукольца, соединенных с концами рамки, которые через щетки соединяются с внешней цепью. Как только рамка повернется на 180° и ЭДС начнет менять знак, полукольца коллектора поменяются местами. Благодаря этому направление тока во внешней цепи останется неизменным, хотя его величина будет изменяться (пульсировать, рис. 10.1, б).

Машина постоянного тока состоит из неподвижной части, служащей для возбуждения главного магнитного поля, и вращающейся части, в которой индуцируются ЭДС и токи, создающие тормозящий момент в генераторе и вращающий момент в двигателе.

Устройство промышленного генератора постоянного тока показано на рис. 10.2.

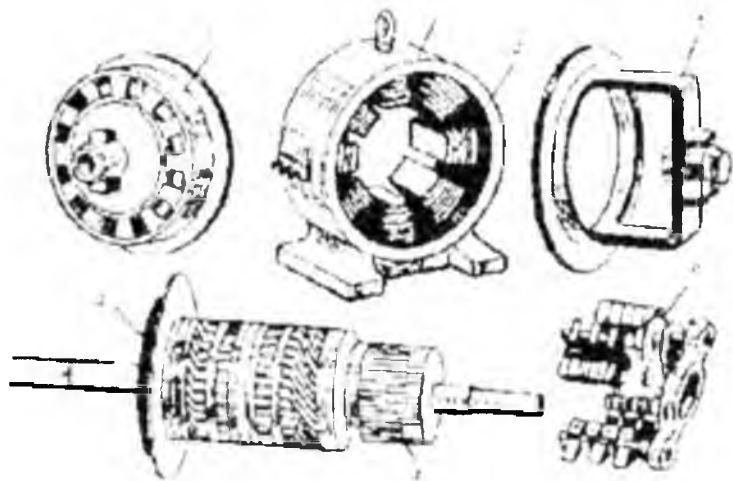


Рис. 10.2

Неподвижная часть генератора состоит из станины 1, на которой находятся главные полюсы 2 с обмотками возбуждения и дополнительные полюсы с обмотками для компенсации ЭДС самоиндукции и реакции якоря. В большинстве случаев электромагниты питаются от самого генератора. Внутри станины помещается якорь 3, представляющий собой металлический цилиндр, набранный из штампованных, изолированных друг от друга пластин электротехнической стали. В продольных пазах на поверхности якоря размещена обмотка, состоящая из соединенных между собой секций. Для сглаживания пульсаций ЭДС и тока обмотка якоря равномерно распределена по всей поверхности. Выводы секций присоединены к изолированным друг от друга и от корпуса машины медным пластинам коллектора 4, причем конец одной секции и начало следующей присоединяют к одной и той же пластине. Коллектор жестко укреплен на валу якоря; на этом же валу

крепится и вентилятор. Вал якоря помещается в подшипники подшипниковых щитов *б*, укрепляемых на боковых сторонах станины. Между якорем и полюсами имеется небольшой воздушный зазор, благодаря которому якорь может свободно вращаться. На цилиндрическую поверхность коллектора накладываются угольные щетки, вставленные в щеткодержатели *в*.

Машины постоянного тока часто делают многополюсными (рис. 10.3), при этом количество изменений значений и знака ЭДС в каждой секции обмотки якоря за один оборот равно количеству полюсов. В таких машинах число пар щеток равно числу пар полюсов, а щетки одинаковой полярности соединяются вместе.

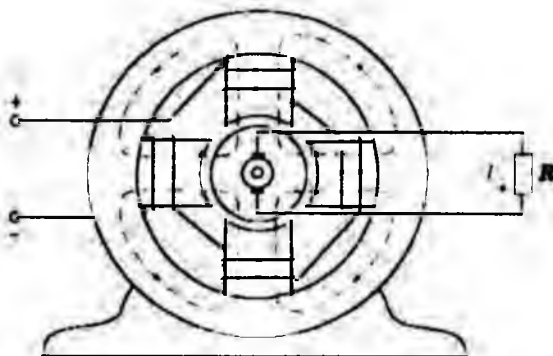


Рис. 10.3

Как и все электрические машины, машины постоянного тока обратимы. Машина работает в режиме генератора, если ее вращает тот или иной первичный двигатель, главное магнитное поле возбуждено, а цепь якоря замкнута через щетки на нагрузку. В этом случае в обмотке якоря индуцируется ЭДС, которая через коллектор и щетки подает ток в нагрузку. В самой машине взаимодействие тока

якоря с главным магнитным полем создает тормозящий момент, который должен преодолевать первичный двигатель. Машина преобразует механическую энергию в электрическую. Если цепь якоря и цепь возбуждения машины присоединены к источнику электроэнергии, то в них возникают токи, взаимодействие которых создает вращающий момент. Под действием этого момента якорь начинает вращаться и машина работает в режиме двигателя, преобразуя электрическую энергию в механическую. Таким образом, одна и та же машина может быть использована и в качестве генератора, и в качестве двигателя.

10.3. ЭДС и вращающий момент генератора постоянного тока

Выясним, как зависит ЭДС генератора постоянного тока от параметров машины, скорости вращения якоря и магнитного потока.

При равномерном перемещении проводника длиной l со скоростью v в магнитном поле с индукцией B (скорость перпендикулярна вектору индукции), в нем по закону электромагнитной индукции возникнет ЭДС e :

$$e = \left| \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = \frac{Bl\Delta x}{\Delta t} = Blv. \quad (10.1)$$

Рассмотрим движение проводника обмотки якоря в магнитном поле под полюсом. Чтобы определить среднее значение ЭДС в этом проводнике, введем понятие средней индукции.

Пусть Φ – магнитный поток, создаваемый главным полюсом, тогда при $2p$ полюсах общий магнитный поток равен $2p\Phi$. Допустим, что индукция

равномерно распределена по всему воздушному зазору. Тогда ее среднее значение

$$B_{\text{ср}} = \frac{2p\Phi}{S} = \frac{2p\Phi}{\pi dl}, \quad (10.2)$$

где S — площадь поверхности якоря, d — диаметр якоря, l — длина образующей цилиндра якоря. Предполагая, что вектор средней магнитной индукции везде направлен по радиусу якоря, т.е. перпендикулярно скорости, мы получим для средней ЭДС в одном проводнике обмотки якоря

$$e_{\text{ср}} = B_{\text{ср}} lv, \quad (10.3)$$

где v — линейная скорость вращения проводника обмотки якоря.

Учитывая, что скорость вращения проводника об-

мотки якоря $v = \omega \frac{d}{2} = 2\pi n \frac{d}{2} = \pi nd$ или в об/мин

$$v = \frac{\pi nd}{60} \quad (\omega \text{ и } n \text{ — угловая скорость и частота вра-}$$

щения якоря, соответственно) и подставляя в (10.3) значение средней индукции (10.2), получим

$$e_{\text{ср}} = \frac{2p\Phi}{\pi dl} \cdot \frac{\pi nd}{60} = \frac{2p}{60} n\Phi. \quad (10.4)$$

Обмотка якоря состоит из N активных проводников. Щетки делят эту обмотку на $2a$ параллельных ветвей. Таким образом, в пределах каждой параллельной ветви последовательно соединяются $N/2a$ активных проводников. Поскольку ЭДС генератора e равна ЭДС параллельной ветви, то для нее можно записать следующее выражение:

$$e = e_{\text{ср}} \frac{N}{2a}. \quad (10.5)$$

Подставляя в (10.5) выражение для средней ЭДС (10.4), получим

$$e = \frac{pN}{60a} n \Phi = c n \Phi, \quad (10.6)$$

где $c = pN/60a$ – постоянная, зависящая только от параметров машины.

Таким образом, мы видим, что ЭДС генератора постоянного тока пропорциональна значению магнитного потока машины Φ и скорости вращения якоря n . Следовательно, для поддержания постоянного напряжения на зажимах генератора можно изменять ЭДС, либо изменяя магнитный поток, либо скорость вращения якоря (либо и то и другое). Обычно якорь генератора приводят во вращение двигателем, работающим при определенной скорости вращения, а магнитный поток изменяют путем изменения тока в обмотке возбуждения.

Вычислим мощность генератора постоянного тока:

$$P = \frac{A}{t}, \quad (10.7)$$

причем работой A следует считать механическую работу, затрачиваемую на преодоление тормозного момента, развиваемого якорем. В формуле (10.7) мощность можно выразить через линейную скорость вращения якоря:

$$P = \frac{F_s}{t} = Fv, \quad (10.8)$$

где F – сила, действующая на якорь, а v – линейная скорость точки на поверхности якоря.

Как мы уже видели, линейная скорость проводника на поверхности якоря $v = \pi n d$, где n – частота вращения якоря, d – диаметр якоря. Подстав-

для выражение для скорости в (10.8) и переходя к оборотам в минуту, получим

$$P = F \pi d \frac{n}{60} \quad (10.9)$$

На каждый проводник обмотки якоря с током I действует по закону Ампера сила $F_1 = IB_{cp} l$, а на N проводников обмотки с учетом формулы (10.2) будет действовать сила

$$F_{cp} = NIB_{cp} l = Nl \frac{2p\Phi}{\pi dl} = \frac{pN}{\pi da} \Phi l \quad (10.10)$$

Подставляя соотношение (10.10) в (10.9) и учитывая формулу (10.6), получим:

$$P = F_{cp} \frac{\pi d n}{60} = \frac{pN}{60a} n \Phi l \cdot c \tau \quad (10.11)$$

Вращающий момент машины можно записать в виде

$$M = F_{cp} \frac{d}{2} = \frac{pN}{\pi da} \Phi l \cdot \frac{d}{2} = c \tau \quad (10.12)$$

где $c = \frac{pN}{2\pi a}$ — постоянный коэффициент, учитывающий особенности конструкции машины.

10.4. Способы возбуждения генераторов постоянного тока

Возбуждением генератора называется создание главного магнитного потока, благодаря которому во вращающемся якоре создается ЭДС. Важнейшим отличительным признаком машин постоянного тока является способ возбуждения главного магнитного поля. Практически во всех современных машинах главное магнитное поле возбуждается электромаг-

нитным путем, для чего по обмотке возбуждения, размещенной на сердечниках полюсов машины, пропускается ток. Все рабочие характеристики машины постоянного тока при работе как в режиме генератора, так и в режиме двигателя зависят от способа включения цепи возбуждения по отношению к цепи якоря. Соединение этих цепей может быть параллельным, последовательным, смешанным и, наконец, цепи эти могут быть независимы друг от друга. При любом способе включения мощность, потребляемая цепью возбуждения, невелика и составляет несколько процентов от номинальной мощности машины.

Генератор с независимым возбуждением. Обмотка возбуждения *ОВ* такого генератора подключена к постороннему источнику тока через регулировочный реостат (рис. 10.4, а).

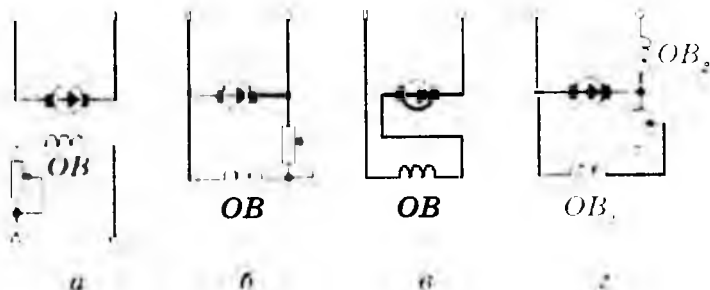


Рис. 10.4

При увеличении тока нагрузки напряжение на зажимах этого генератора несколько уменьшается из-за падения напряжения на обмотке якоря и в результате действия реакции якоря, которая уменьшает магнитный поток машины. Для поддержания постоянного напряжения на зажимах генератора изменяют ток возбуждения с помощью регулиро-

вочного реостата. Внешняя характеристика этого генератора (зависимость напряжения на зажимах от тока нагрузки) показана на рис. 10.5 (кривая 1).

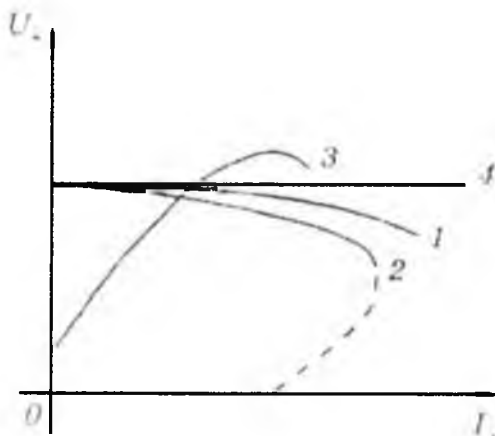


Рис. 10.5

Генератор с параллельным возбуждением. Это генератор с самовозбуждением: обмотку возбуждения OB такого генератора подключают через регулировочный реостат параллельно обмотке якоря (рис. 10.4, б). При увеличении тока нагрузки напряжение на зажимах генератора с параллельным возбуждением уменьшается из-за падения напряжения на обмотке якоря. Это в свою очередь вызывает уменьшение тока возбуждения и ЭДС в якоре. Поэтому при увеличении тока нагрузки напряжение на зажимах генератора с параллельным возбуждением уменьшается быстрее, чем у генератора с независимым возбуждением. Дальнейшее увеличение тока нагрузки приводит к такому сильному уменьшению тока возбуждения, что при коротком замыкании цепи нагрузки напряжение генератора

падает до нуля. Поэтому короткое замыкание генератора с параллельным возбуждением неопасно. Внешняя характеристика этого генератора показана на рис. 10.5 (кривая 2).

Генератор с последовательным возбуждением. Это также генератор с самовозбуждением, но его обмотка возбуждения OB включена последовательно с якорем (рис. 10.4, в) и по обеим обмоткам протекает одинаковый ток. При отсутствии нагрузки (внешняя цепь разомкнута) в якоре все же возбуждается небольшая ЭДС вследствие остаточной индукции стального сердечника статора. При увеличении тока нагрузки напряжение на зажимах генератора сначала растет до тех пор, пока не наступит насыщение магнитной системы машины, после чего оно начинает быстро уменьшаться из-за падения напряжения на сопротивлении якоря и вследствие размагничивающего действия реакции якоря (кривая 3 на рис. 10.5). Ввиду сильной зависимости напряжения на зажимах генератора от нагрузки генераторы с последовательным возбуждением применяются очень редко.

Генератор со смешанным возбуждением. Этот генератор также относится к генераторам с самовозбуждением, но имеет две обмотки возбуждения: OB_1 , которая включается параллельно якорю, и OB_2 , которая включается последовательно с якорем (рис. 10.4, г). Обмотки включают так, чтобы они создавали магнитные потоки одного направления, а число витков в обмотках выбирают таким, чтобы падение напряжения на внутреннем сопротивлении генератора и ЭДС реакции якоря были бы скомпенсированы ЭДС от потока параллельной обмотки. Благодаря этому напряжение на зажимах генератора со смешанным возбуждением остается практически

постоянным при изменениях нагрузки в определенных пределах (кривая 4 на рис. 10.5).

10.5. Двигатели постоянного тока

Принцип работы двигателя постоянного тока основан на взаимодействии проводника с током с постоянным магнитным полем электромагнитов. Если генератор включить в сеть постоянного тока, то в обмотках якоря и электромагнитов установится ток и на каждый проводник обмотки якоря, находящийся в магнитном поле электромагнитов, начнет действовать сила, стремящаяся повернуть якорь (рис. 10.6, а). Из рис. 10.6 видно, что при изменении направления тока только в якоре (рис. 10.6, б) или только в обмотке возбуждения (рис. 10.6, в) направление вращения якоря изменяется на противоположное, а одновременное изменение направления тока в обеих обмотках не изменяет направление вращения якоря (рис. 10.6, г). Отсюда следует, что для изменения направления вращения двигателя постоянного тока нужно поменять местами либо концы обмотки якоря, либо концы обмотки возбуждения.

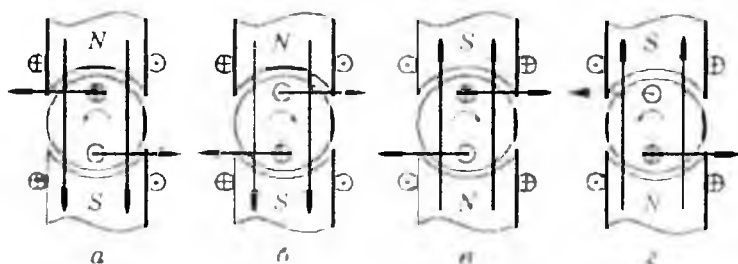


Рис. 10.6

Если двигатель постоянного тока с сопротивлением обмотки якоря R_a включить в сеть с напряжением U , то в момент пуска в якоре установится ток

$$I_a = \frac{U}{R_a}$$

Поскольку сопротивление якоря мало, то пусковой ток в нем будет очень большим, превышая номинальный в десятки раз. От такого тока могут пострадать обмотка якоря, а также коллектор и щетки. Пусковой ток можно ограничить путем включения последовательно с обмоткой якоря пускового реостата. В этом случае пусковой ток

$$I_a = \frac{U}{R_a + R_p}$$

Сопротивление пускового реостата R_p выбирают таким, чтобы пусковой ток не превышал номинальный более чем в 1,2–1,5 раза.

В результате взаимодействия якоря с магнитным полем полюсов якорь начнет вращаться. Так как его обмотка начнет вращаться в магнитном поле, то в ней будет индуцироваться ЭДС, которая будет направлена против приложенного к двигателю напряжения. Величина этой ЭДС прямо пропорциональна числу оборотов двигателя и величине магнитного потока. Однако в отличие от генератора в двигателе эта ЭДС будет меньше приложенного от сети напряжения на величину падения напряжения в якоре машины:

$$U = e + I_a R_a, \quad (10.13)$$

отсюда ток в якоре при выведенном пусковом реостате

$$i = \frac{U - e}{R_a} \quad (10.14)$$

Умножив обе части уравнения (10.13) на I_a , получим:

$$I_a U = I_a e + I_a^2 R_a. \quad (10.15)$$

Левая часть уравнения (10.15) представляет собой электрическую мощность, потребляемую двигателем из сети, а второй член правой части $I_a^2 R_a$ — мощность, поглощаемую сопротивлением якоря. Очевидно, что $I_a e$ — это полезная электрическая мощность, которая может быть преобразована в другие виды энергии. Следовательно, это та часть потребляемой из сети электрической мощности, которая преобразуется двигателем в механическую (включая механические потери). Таким образом, ЭДС самоиндукции в двигателе постоянного тока влияет на преобразование потребляемой из сети электрической энергии в механическую.

Подставим выражение для ЭДС генератора (10.6) (ЭДС, индуцируемая в якоре двигателя, выражается той же формулой) в (10.14) и выразим отсюда скорость вращения двигателя:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{c \Phi} \quad (10.16)$$

Мы видим, что скорость вращения двигателя прямо пропорциональна подводимому напряжению и обратно пропорциональна величине магнитного потока. Отсюда следует, что регулирование скорости вращения двигателя постоянного тока можно осуществлять, либо изменяя сопротивление цепи якоря (при постоянном напряжении сети), либо путем изменения магнитного потока.

10.6. Способы возбуждения двигателей постоянного тока

Все рабочие характеристики двигателя постоянного тока, как и генератора, зависят от способа включения цепи возбуждения по отношению к цепи якоря. Соединение этих цепей может быть параллельным, последовательным, смешанным и, наконец, они могут быть независимы друг от друга.

Двигатели с параллельным и независимым возбуждением. Схема включения двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением показана на рис. 10.7, где $ПР$ – пусковой реостат, а $РР$ – регулировочный реостат.

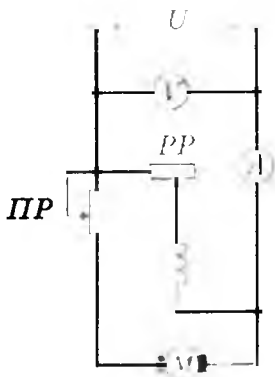


Рис. 10.7

Если обмотку возбуждения такого двигателя подключить через регулировочный реостат $РР$ к другому источнику постоянного напряжения, то получится двигатель с независимым возбуждением.

Скоростная характеристика таких двигателей $n = f(I_{я})$ при $U = const$ и $I_e = const$ приведена на рис. 10.8.

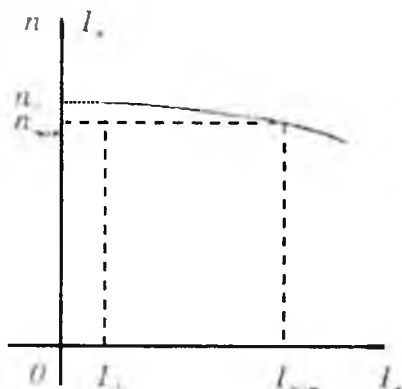


Рис. 10.8

Для объяснения ее вида обратимся к формуле (10.16). Изменение скорости вращения может происходить за счет изменения нагрузки и магнитного потока. Увеличение тока нагрузки незначительно изменяет внутреннее падение напряжения из-за малости сопротивления цепи якоря и поэтому лишь незначительно уменьшает скорость вращения двигателя. Что же касается магнитного потока, то вследствие реакции якоря при увеличении тока нагрузки он несколько уменьшается, что приводит к незначительному увеличению скорости вращения двигателя. Таким образом, скорость вращения двигателя с параллельным возбуждением изменяется очень мало.

Скорость вращения двигателя с независимым возбуждением можно регулировать изменением либо сопротивления цепи якоря, либо магнитного потока. Следует отметить, что чрезмерное уменьшение тока возбуждения и особенно случайный обрыв этой цепи очень опасны для двигателей с параллельным и независимым возбуждением, так как ток в якоре

может возрасти до недопустимо больших значений. При небольшой нагрузке (или на холостом ходу) скорость может настолько возрасти, что это станет опасным для целостности двигателя.

Двигатель с последовательным возбуждением. Схема включения двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением показана на рис. 10.9.



Рис. 10.9

У такого двигателя ток якоря является одновременно и током возбуждения, так как обмотка возбуждения включена последовательно с якорем. Поэтому магнитный поток двигателя изменяется с изменением нагрузки. Выражение для скорости вращения двигателя последовательного возбуждения можно получить из формулы (10.16), заменив сопротивление якоря $R_{\text{я}}$ на $(R_{\text{я}} + R_{\text{с}})$, где $R_{\text{с}}$ — сопротивление обмотки возбуждения:

$$n = \frac{U - I_{\text{я}}(R_{\text{я}} + R_{\text{с}})}{c\Phi} \quad (10.17)$$

Скоростная характеристика двигателя последовательного возбуждения приведена на рис. 10.10.

Из этой характеристики видно, что скорость двигателя сильно зависит от нагрузки. При увеличении нагрузки увеличивается падение напряжения на сопротивлении обмоток при одновременном уве-

личении магнитного потока, что приводит к значительному уменьшению скорости вращения двигателя. Это характерная особенность двигателя с последовательным возбуждением. Значительное уменьшение нагрузки приводит к опасному для двигателя увеличению скорости вращения. Поэтому такие двигатели не следует пускать вхолостую или с малой нагрузкой.

Регулирование скорости вращения двигателя с последовательным возбуждением может осуществляться путем изменения либо магнитного потока, либо напряжения питания.

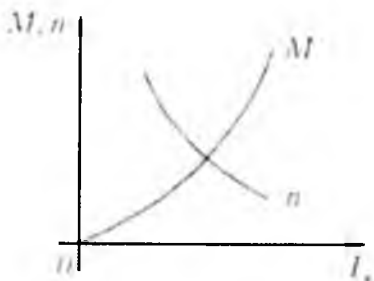


Рис. 10.10

Согласно формуле (10.12), вращающий момент двигателя пропорционален току якоря и магнитному потоку. В свою очередь магнитный поток в отсутствие насыщения пропорционален току возбуждения, который для данного двигателя является и током якоря:

$$M = c \Phi I_a = c_1 I_a^2. \quad (10.18)$$

Мы видим, что вращающий момент пропорционален квадрату тока якоря. Квадратичная зависимость вращающего момента от тока нагрузки является еще одной характерной особенностью таких двигателей, благодаря которой эти двигатели легко

переносят большие кратковременные перегрузки и развивают большой пусковой момент.

Двигатели с последовательным возбуждением применяют в тех случаях, когда необходим большой пусковой момент или способность выдерживать кратковременные перегрузки, а также исключена возможность их полной разгрузки. Они оказались незаменимыми в качестве тяговых двигателей на электрическом транспорте (трамваи, троллейбусы, метро и электровозы), а также на подъемных кранах и для пуска двигателей внутреннего сгорания (стартеры) на автомобилях и авиационных двигателях.

Двигатель со смешанным возбуждением. Схема включения двигателя постоянного тока со смешанным возбуждением показана на рис. 10.11.



Рис. 10.11

На каждом полюсе такого двигателя имеются две обмотки – параллельная и последовательная. Их можно включить так, чтобы магнитные потоки складывались (согласное включение) или вычитались (встречное включение). Формулы для скорости вращения и для вращающего момента двигателя со смешанным возбуждением выглядят следующим образом:

$$n = \frac{U - I_{я} R_{я}}{c(\Phi_{\text{парал}} \pm \Phi_{\text{послед}})}, \quad (10.19)$$

$$M = c I_{я} (\Phi_{\text{парал}} \pm \Phi_{\text{послед}}). \quad (10.20)$$

В этих формулах знак плюс относится к согласному включению обмоток возбуждения, а минус — к встречному. В зависимости от соотношения магнитных потоков обеих обмоток двигатель со смешанным возбуждением по своим свойствам приближается либо к двигателю с параллельным возбуждением, либо к двигателю с последовательным возбуждением. Как правило, у двигателей со смешанным возбуждением последовательная обмотка является главной (рабочей), а параллельная вспомогательной. Благодаря наличию магнитного потока параллельной обмотки скорость вращения такого двигателя не может сильно возрастать при малых нагрузках.

Двигатели с согласным включением широко применяются в тех случаях, когда необходим большой пусковой момент и регулировка скорости при переменных нагрузках (включая малые нагрузки и холостой ход). Двигатели со встречным включением обмоток применяются в тех случаях, когда необходима постоянная скорость при изменяющейся нагрузке.

Вопросы для повторения

1. Изложите принцип работы генератора постоянного тока.
2. Опишите устройство промышленного генератора постоянного тока.
3. От чего зависит ЭДС и вращающий момент генератора постоянного тока?

4. Перечислите способы возбуждения генераторов постоянного тока и нарисуйте соответствующие схемы их включения.
5. Что такое обратимость машин постоянного тока?
6. Опишите принцип работы и устройство двигателя постоянного тока.
7. Что нужно сделать для того, чтобы поменять направление вращения двигателя постоянного тока?
8. От чего зависит скорость вращения двигателя постоянного тока и как ее можно регулировать?
9. Перечислите способы возбуждения двигателей постоянного тока и нарисуйте соответствующие схемы их включения.

Глава 11. Электронные приборы

11.1. Общие сведения о полупроводниках

Полупроводниками называют вещества, удельная проводимость которых имеет промежуточное значение между удельными проводимостями металлов и диэлектриков. Полупроводники одновременно являются плохими проводниками и плохими диэлектриками. Граница между полупроводниками и диэлектриками условна, так как диэлектрики при высоких температурах могут вести себя как полупроводники, а чистые полупроводники при низких температурах ведут себя как диэлектрики. В металлах концентрация электронов практически не зависит от температуры, а в полупроводниках носители заряда возникают лишь при повышении температуры или при поглощении энергии от другого источника.

Типичными полупроводниками являются углерод (C), германий (Ge) и кремний (Si). Германий – это хрупкий серовато-белый элемент, открытый в 1886 г. Источником порошкообразной двуокиси германия, из которой получают твердый чистый германий, являются золы некоторых сортов угля.

Кремний был открыт в 1823 г. Он широко распространен в земной коре в виде кремнезема (дву-

окси кремния), силикатов и алюмосиликатов. Двухокисью кремния богаты песок, кварц, агат и кремний. Из двуокиси кремния химическим путем получают чистый кремний. Кремний является наиболее широко используемым полупроводниковым материалом.

Рассмотрим подробнее образование электронов проводимости в полупроводниках на примере кремния. Атом кремния имеет порядковый номер $Z = 14$ в периодической системе Менделеева. Поэтому в состав его атома входят 14 электронов. Однако только четыре из них находятся на незаполненной внешней оболочке и являются слабо связанными. Эти электроны называются валентными и обуславливают четыре валентности кремния. Атомы кремния способны объединять свои валентные электроны с другими атомами кремния с помощью так называемой ковалентной связи (рис. 11.1). При ковалентной связи валентные электроны совместно используются различными атомами, что приводит к образованию кристалла.

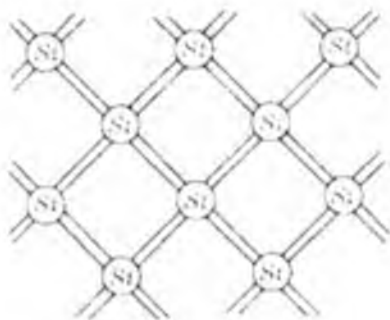


Рис. 11.1

При повышении температуры кристалла тепловые колебания решетки приводят к разрыву неко-

торых валентных связей. В результате этого часть электронов, ранее участвовавших в образовании валентных связей, отщепляется и становится электронами проводимости. При наличии электрического поля они перемещаются против поля и образуют электрический ток.

Однако при освобождении электрона в кристаллической решетке образуется незаполненная межатомная связь. Такие «пустые» места с отсутствующими электронами связи получили название «дырок». Возникновение дырок в кристалле полупроводника создает дополнительную возможность для переноса заряда. Действительно, дырка может быть заполнена электроном, перешедшим под действием тепловых колебаний от соседнего атома. В результате на этом месте будет восстановлена нормальная связь, но зато в другом месте появится дырка. В эту новую дырку в свою очередь может перейти какой-либо из других электронов связи и т.д. Последовательное заполнение свободной связи электронами эквивалентно движению дырки в направлении, противоположном движению электронов. Таким образом, если при наличии электрического поля электроны перемещаются против поля, то дырки будут двигаться в направлении поля, т.е. так, как двигались бы положительные заряды. Следовательно, в полупроводнике имеются два типа носителей тока — электроны и дырки, а общая проводимость полупроводника является суммой электронной проводимости (n -типа, от слова *negative*) и дырочной проводимости (p -типа, от слова *positive*).

Наряду с переходами электронов из связанного состояния в свободное существуют обратные переходы, при которых электрон проводимости улавливается на одно из вакантных мест электронов связи. Этот процесс называют рекомбинацией электро-

на и дырки. В состоянии равновесия устанавливается такая концентрация электронов (и равная ей концентрация дырок), при которой число прямых и обратных переходов в единицу времени одинаково.

Рассмотренный процесс проводимости в чистых полупроводниках называется *собственной проводимостью*. Собственная проводимость быстро возрастает с повышением температуры, и в этом существенное отличие полупроводников от металлов, у которых с повышением температуры проводимость уменьшается. Все полупроводниковые материалы имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления.

Чистые полупроводники являются объектом главным образом теоретического интереса. Основные исследования полупроводников связаны с влиянием добавления примесей в чистые материалы. Без этих примесей не было бы большинства полупроводниковых приборов.

Чистые полупроводниковые материалы, такие как германий и кремний, содержат при комнатной температуре небольшое количество электронно-дырочных пар и поэтому могут проводить очень маленький ток. Для увеличения проводимости чистых материалов используется легирование.

Легирование — это добавление примесей в полупроводниковые материалы. Используются два типа примесей. Примеси первого типа — пятивалентные — состоят из атомов с пятью валентными электронами, например, мышьяк и сурьма. Примеси второго типа — трехвалентные — состоят из атомов с тремя валентными электронами, например, индий и галлий.

Когда чистый полупроводниковый материал легируется пятивалентным материалом, таким как мышьяк (As), то некоторые атомы полупроводника замещаются атомами мышьяка (рис. 11.2).

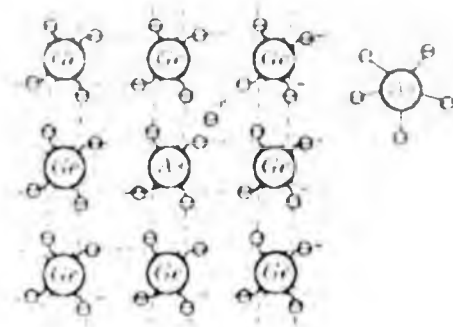


Рис. 11.2

Атом мышьяка вводит четыре своих валентных электрона в ковалентные связи с соседними атомами. Его пятый электрон слабо связан с ядром и легко может стать свободным. Атом мышьяка называется *донорским*, поскольку он отдает свой лишний электрон. В легированном полупроводниковом материале находится достаточное количество донорских атомов, а следовательно, и свободных электронов для поддержания тока.

При комнатной температуре количество дополнительных свободных электронов превышает количество электронно-дырочных пар. Это означает, что в материале больше электронов, чем дырок. Поэтому электроны называют *основными носителями*. Дырки называют *неосновными носителями*. Поскольку основные носители имеют отрицательный заряд, такой материал называется полупроводником *n*-типа.

Когда полупроводниковый материал легирован трехвалентными атомами, например атомами индия (In), то эти атомы разместят свои три валентных электрона среди трех соседних атомов (рис. 11.3).

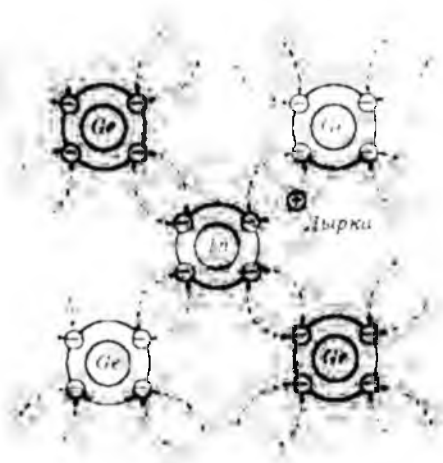


Рис. 11.3

Это создаст в ковалентной связи дырку. Наличие дополнительных дырок позволит электронам легко дрейфовать от одной ковалентной связи к другой. Так как дырки легко принимают электроны, атомы, которые вносят в полупроводник дополнительные дырки, называются *акцепторными*.

При обычных условиях количество дырок в таком материале значительно превышает количество электронов. Следовательно, дырки являются основными носителями, а электроны – неосновными. Поскольку основные носители имеют положительный заряд, материал называется полупроводником *p*-типа.

Полупроводниковые материалы *n*- и *p*-типов имеют значительно более высокую проводимость, чем чистые полупроводники. Эта проводимость может быть увеличена или уменьшена путем изменения количества примесей. Чем сильнее полупроводниковый материал легирован, тем меньше его электрическое сопротивление.

Контакт двух полупроводников с различными типами проводимости называется *p-n*-переходом и обладает очень важным свойством – его сопротивление зависит от направления тока. Отметим, что такой контакт нельзя получить, прижимая друг к другу два полупроводника. *p-n*-переход создается в одной пластине полупроводника путем образования в ней областей с различными типами проводимости. Методы получения *p-n*-переходов описаны ниже.

Итак, в куске монокристаллического полупроводника на границе между двумя слоями с различного рода проводимостями образуется *p-n*-переход. На ней имеет место значительный перепад концентраций носителей зарядов. Концентрация электронов в *n*-области во много раз больше их концентрации в *p*-области. Вследствие этого электроны диффундируют в область их низкой концентрации (в *p*-область). Здесь они рекомбинируют с дырками и таким путем создают пространственный отрицательный заряд ионизированных атомов акцептора, не скомпенсированный положительным зарядом дырок.

Одновременно происходит диффузия дырок в *n*-область. Здесь создается не скомпенсированный зарядом электронов пространственный положительный заряд ионов донора. Таким образом, на границе создается двойной слой пространственного заряда (рис. 11.4, а), обедненный основными носителями тока. В этом слое возникает контактное электрическое поле E_p , препятствующее дальнейшему переходу электронов и дырок из одной области в другую.

Контактное поле поддерживает состояние равновесия на определенном уровне. Но и в этом случае под действием тепла небольшая часть электронов и дырок будет продолжать проходить через потенциальный барьер, обусловленный пространственными зарядами, создавая ток диффузии. Однако одновре-

менно с этим под действием контактного поля основные носители заряда p - и n -областей (электроны и дырки) создают небольшой ток проводимости. В состоянии равновесия эти токи взаимно компенсируются.

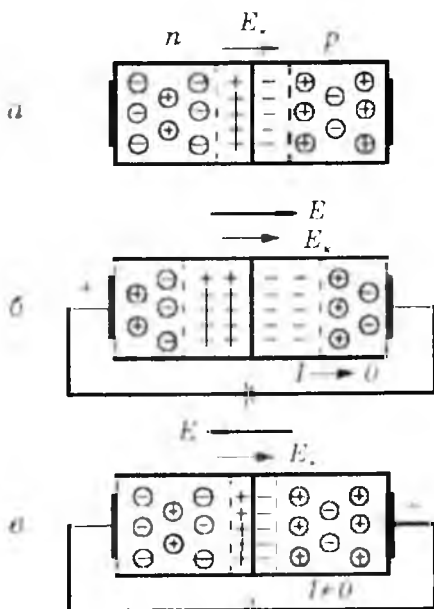


Рис. 11.4

Если к p - n -переходу подключить внешний источник тока, то напряжение указанной на рис. 11.4,б обратной полярности приведет к появлению внешнего поля E , совпадающего по направлению с контактным полем E_c . В результате ширина двойного слоя увеличится и тока за счет основных носителей практически не будет. В цепи возможен лишь не-

значительный ток за счет неосновных носителей (обратный ток $I_{обр}$).

При включении напряжения прямой полярности направление внешнего поля противоположно направлению контактного поля (рис. 11.4, в). Ширина двойного слоя уменьшится, и в цепи возникнет большой прямой ток $I_{пр}$. Таким образом, p - n -переход обладает ярко выраженной односторонней проводимостью. Это отражает его вольтамперная характеристика (рис. 11.5).

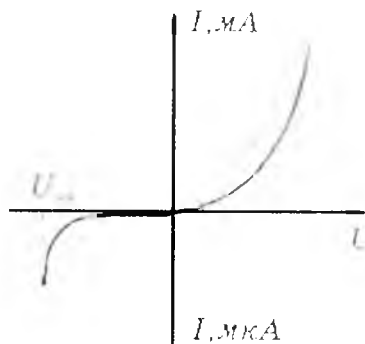


Рис. 11.5

Когда к p - n -переходу приложено прямое напряжение, ток быстро возрастает с ростом напряжения. Когда же к p - n -переходу приложено обратное напряжение, ток очень мал, быстро достигает насыщения и не изменяется до некоторого предельного значения обратного напряжения, после чего резко возрастает. Это так называемое *напряжение пробоя* $U_{пр}$, при котором наступает пробой p - n -перехода и он разрушается. Следует отметить, что на рис. 11.5 масштаб обратного тока в тысячу раз меньше масштаба прямого тока.

11.2. Полупроводниковые диоды

p-n-переход является основой полупроводниковых диодов, которые применяются для выпрямления переменного тока и для других нелинейных преобразований электрических сигналов.

Диод проводит ток в прямом направлении только тогда, когда величина внешнего напряжения (в вольтах) больше потенциального барьера (в электронвольтах). Для германиевого диода минимальное внешнее напряжение равно 0,3 В, а для кремниевого – 0,7 В.

Когда диод начинает проводить ток, на нем появляется падение напряжения. Это падение напряжения равно потенциальному барьеру и называется *прямым падением напряжения*.

Все диоды обладают малым обратным током. В германиевых диодах он измеряется в микроамперах, а в кремниевых – в наноамперах. Германиевый диод имеет больший обратный ток и более чувствителен к температуре. Этот недостаток германиевых диодов компенсируется невысоким потенциальным барьером.

При комнатной температуре обратный ток мал. При повышении температуры обратный ток увеличивается, нарушая работу диода. В германиевых диодах обратный ток выше, чем в кремниевых диодах, и сильнее зависит от температуры, удваиваясь при повышении температуры приблизительно на 10 °С.

Схематическое обозначение диода показано на рис. 11.6. *p*-часть представлена стрелкой, а *n*-часть



Рис. 11.6

– чертой. Прямой ток течет от части p к части n (по стрелке). Часть n называется катодом, а часть p – анодом.

Существуют три типа p - n -переходов: выращенные переходы, вплавленные переходы и диффузионные переходы, которые изготавливаются по различным технологиям. Методы изготовления каждого из этих переходов различны.

Метод выращивания перехода (наиболее ранний) состоит в следующем: чистый полупроводниковый материал и примеси p -типа помещают в кварцевый контейнер и нагревают до тех пор, пока они не расплавятся. В расплавленную смесь помещают маленький полупроводниковый кристалл, называемый затравкой. Затравочный кристалл медленно вращается и вытягивается из расплава настолько медленно, чтобы на нем успел нарасти слой расплавленной смеси. Расплавленная смесь, нарастая на затравочный кристалл, охлаждается и затвердевает. Она имеет такую же кристаллическую структуру, как и затравка. После вытягивания затравка оказывается попеременно легированной примесями n - и p -типов. Это создает в выращенном кристалле слои n - и p -типов. Таким образом, выращенный кристалл состоит из многих p - n слоев.

Метод создания вплавленных p - n -переходов предельно прост. Маленькая гранула трехвалентного материала, такого как индий, размещается на кристалле полупроводника n -типа. Гранула и кристалл нагреваются до тех пор, пока гранула не расплавится сама и частично не расплавит полупроводниковый кристалл. На участке, где они стыкуются, образуется материал p -типа. После охлаждения материал перекристаллизовывается и формируется твердый p - n -переход.

В настоящее время чаще всего используют диффузионный метод получения p - n -переходов. Маска с прорезями размещается над тонким срезом полупроводника p - или n -типа, который называется подложкой. После этого подложка помещается в печь и подвергается контакту с примесями, находящимися в газообразном состоянии. При высокой температуре атомы примеси проникают в подложку. Глубина проникновения контролируется длительностью экспозиции и температурой.

После формирования p - n -перехода диод надо поместить в корпус, чтобы защитить его от влияния окружающей среды и механических повреждений. Корпус должен также обеспечить возможность соединения диода с цепью. Вид корпуса определяется назначением диода (рис. 11.7).

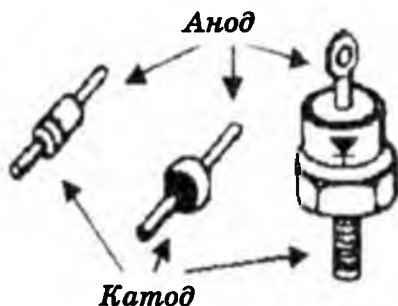


Рис. 11.7

Если через диод должен протекать большой ток, корпус должен быть рассчитан так, чтобы уберечь p - n -переход от перегрева.

Диод можно проверить путем измерения с помощью омметра прямого и обратного сопротивлений. Величина этих сопротивлений характеризует способность диода пропускать ток в одном направлении и не пропускать ток в другом направлении.

Германиевый диод имеет низкое прямое сопротивление, порядка 100 Ом, а его обратное сопротивление превосходит 100 000 Ом. Прямые и обратные сопротивления кремниевых диодов выше, чем у германиевых. Проверка диода с помощью омметра должна показать низкое прямое сопротивление и высокое обратное сопротивление.

Если положительный вывод омметра соединен с анодом диода, а отрицательный вывод с катодом, то диод смещен в прямом направлении. В этом случае через диод идет ток, и омметр показывает низкое сопротивление. Если выводы омметра поменять местами, то диод будет смещен в обратном направлении, через него будет идти маленький ток, и омметр покажет высокое сопротивление.

Если сопротивление диода низкое в прямом и в обратном направлениях, то он, вероятно, закорочен. Если диод имеет высокое сопротивление и в прямом и в обратном направлениях, то в нем, вероятно, разорвана цепь.

Как германиевые, так и кремниевые диоды могут быть повреждены сильным нагреванием или высоким обратным напряжением. Производители указывают максимальный прямой ток, который может безопасно течь через диод, не перегревая его, а также максимальное обратное напряжение. Дело в том, что высокое обратное напряжение, приложенное к диоду, может создать сильный обратный ток, который перегреет диод и приведет к его пробой. Обратное напряжение, при котором наступает пробой, называется напряжением пробоя, или максимальным обратным напряжением.

11.3. Стабилитроны

Для работы при напряжениях, превышающих напряжение пробоя диода, предназначены специальные диоды, которые называются *стабилитронами*. В этом случае область обратных напряжений, при которой наступает пробой, называется *областью стабилизации*.

Когда обратное напряжение достаточно велико, чтобы вызвать пробой стабилитрона, через него течет высокий обратный ток. До наступления пробоя обратный ток невелик. После наступления пробоя обратный ток резко возрастает. Это происходит потому, что сопротивление стабилитрона уменьшается при увеличении обратного напряжения.

Стабилитроны выпускают с определенным напряжением пробоя, которое называют *напряжением стабилизации*. Напряжение пробоя стабилитрона определяется удельным сопротивлением диода. Оно в свою очередь зависит от техники легирования, использованной при его изготовлении. Паспортное напряжение пробоя – это обратное напряжение при токе стабилизации. Ток стабилизации несколько меньше максимального обратного тока диода. Напряжение пробоя обычно указывается с точностью от 1 до 20%.

Способность стабилитрона рассеивать мощность уменьшается при увеличении температуры. Следовательно, рассеиваемая стабилитроном мощность указывается для определенной температуры. Величина рассеиваемой мощности также зависит от длины выводов: чем короче выводы, тем большая мощность рассеивается на диоде. Производитель указывает также коэффициент отклонения для определения рассеиваемой мощности при других температурах. Например, коэффициент отклонения 6 милли-

ватт на градус Цельсия означает, что рассеиваемая диодом мощность уменьшается на 6 милливольт при повышении температуры на один градус.

Корпуса стабилитронов имеют такую же форму, как и у обычных диодов.

Маломощные стабилитроны выпускаются в корпусах из стекла или эпоксидной смолы, а мощные – в металлическом корпусе с винтом. Схематическое обозначение стабилитрона показано на рис. 11.8.



Рис. 11.8

Основными параметрами стабилитронов являются максимальный ток стабилизации, обратный ток и обратное напряжение. *Максимальный ток стабилизации* – это максимальный обратный ток, который может течь через стабилитрон без превышения рассеиваемой мощности, указанной производителем. *Обратный ток* – это ток утечки перед началом пробоя. Он указывается при некотором обратном напряжении, равном примерно 80% напряжения стабилизации.

Стабилитроны используют для стабилизации напряжения, например, для компенсации изменения напряжения линии питания или изменения резистивной нагрузки, питаемой постоянным током.

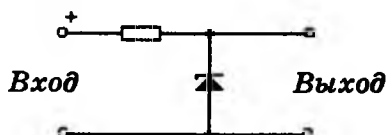


Рис. 11.9

На рис. 11.9 показана типичная регулирующая цепь со стабилитроном. Стабилитрон соединен последовательно с резистором R . Резистор обуславливает прохождение через стабилитрон такого тока, чтобы он работал в режиме пробоя (стабилизации). Входное постоянное напряжение должно быть выше напряжения стабилизации стабилитрона. Падение напряжения на стабилитроне равно напряжению стабилизации стабилитрона. Падение напряжения на резисторе равно разности входного напряжения и напряжения стабилизации.

Входное напряжение может увеличиваться или уменьшаться. Это обуславливает соответствующее увеличение или уменьшение тока через стабилитрон. Когда стабилитрон работает при напряжении стабилизации (в области пробоя), при увеличении входного напряжения через него может идти большой ток. Однако напряжение на стабилитроне останется прежним. Стабилитрон оказывает противодействие увеличению входного напряжения, так как при увеличении тока его удельное сопротивление падает. Это позволяет выходному напряжению на стабилитроне оставаться постоянным при изменениях входного напряжения. Изменение входного напряжения проявляется только в изменении падения напряжения на последовательно включенном резисторе. Сумма падений напряжения на этом резисторе и стабилитроне равна входному напряжению. Выходное напряжение снимается со стабилитрона. Выходное напряжение может быть увеличено или уменьшено путем замены стабилитрона и включенного последовательно с ним резистора.

Описанная цепь выдает постоянное напряжение. При расчете цепи должны учитываться как ток, так и напряжение. Внешняя нагрузка потребляет ток, который определяется ее сопротивлением и выход-

ным напряжением. Через резистор, включенный последовательно со стабилитроном, протекает и ток нагрузки, и ток стабилизации. Этот резистор должен быть подобран таким образом, чтобы через стабилитрон шел ток стабилизации и он находился в области пробоя.

При увеличении резистивной нагрузки идущий через нее ток уменьшается, что должно вызвать увеличение падения напряжения на нагрузке. Но стабилитрон препятствует любому изменению напряжения. Сумма тока стабилизации и тока нагрузки через последовательно включенный резистор остается постоянной. Это обеспечивает постоянство падения напряжения на последовательно включенном резисторе. Аналогично, когда ток через нагрузку увеличивается, ток стабилизации уменьшается, обеспечивая постоянство напряжения. Это позволяет цепи поддерживать выходное напряжение постоянным при колебаниях входного.

11.4. Тиристоры

Тиристоры – это обширный класс полупроводниковых приборов, используемых для электронного переключения. Эти полупроводниковые устройства обладают двумя устойчивыми состояниями и имеют три или более *p-n*-переходов. Тиристоры охвачены внутренней положительной обратной связью, позволяющей увеличивать амплитуду выходного сигнала путем подачи на вход части выходного напряжения.

Тиристоры широко используются при управлении мощностью постоянного и переменного токов. Они применяются для включения и выключения мощности, подаваемой на нагрузку, а также для регулирования ее величины, например для управле-

ния освещенностью или скоростью вращения двигателя.

Тиристоры изготавливаются из кремния диффузионным или диффузионно-сплавным методом и состоят из четырех полупроводниковых слоев p -типа и n -типа, расположенных поочередно. На рис. 11.10 изображены упрощенная схема тиристора (а), его вольтамперная характеристика (б) и его схематическое обозначение (в).

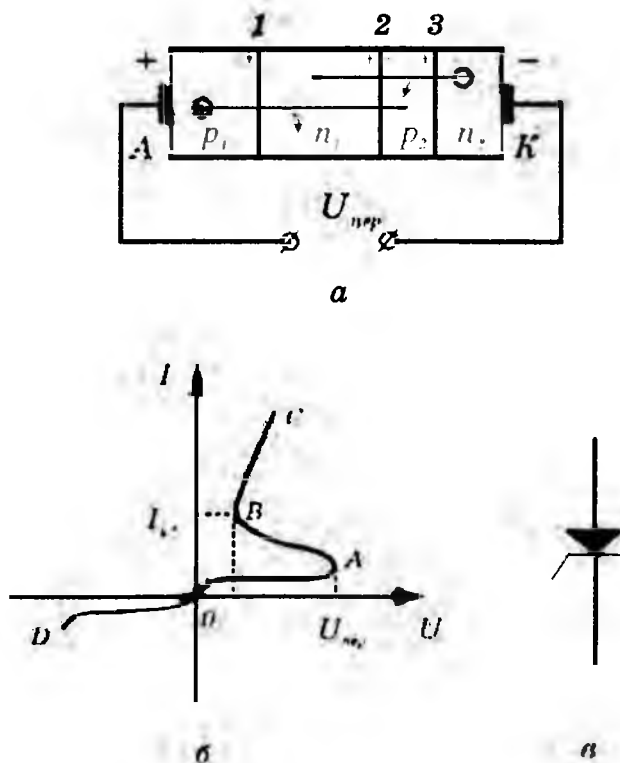


Рис. 11.10

Четыре слоя прилегают друг к другу, образуя три p - n -перехода. Два крайних вывода – это анод и ка-

тод, а к одному из средних слоев может быть подключен управляющий электрод. Данный тиристор не содержит управляющего электрода, и управление его открыванием и закрыванием осуществляется путем изменения приложенного к нему напряжения. Такие тиристоры называются *динисторами*.

При указанной на рис. 11.10, а полярности приложенного к тиристорному напряжению, основная его часть придется на закрытый *p-n*-переход 2, тогда как переходы 1 и 3 окажутся открытыми. При этом дырки, переходящие из слоя p_1 в слой p_2 , частично рекомбинируют с электронами в слое n_1 . Их некомпенсированный заряд в слое p_2 вызовет вторичную встречную инжекцию электронов из слоя n_2 , и электроны из слоя n_2 пройдут через слой p_2 в слой n_1 , частично рекомбинируя с дырками в слое p_2 . Они вызовут вторичную встречную инжекцию дырок из слоя p_1 . Эти явления создадут необходимые условия для развития лавинного процесса. Однако лавинный процесс начнется только при некотором достаточно большом внешнем напряжении $U_{\text{пер}}$. При этом тиристор перейдет из точки *A* вольтамперной характеристики на участок *BC* (рис. 11.10, б), и ток через него резко возрастет. При этом благодаря обилию зарядов в переходе 2 напряжение на нем сильно упадет (примерно до 1 В), и энергия, выделяемая в этом переходе, окажется недостаточной для развития необратимых процессов в структуре прибора.

Если ток через тиристор сильно уменьшить до некоторого значения $I_{\text{уд}}$ (тока удержания), то тиристор закроется и перейдет в состояние с низкой проводимостью (участок *OA* на рис. 11.10, б). Если к тиристорному приложить напряжение обратной полярности, то его вольтамперная характеристика будет такой же, как у полупроводникового диода (участок *OD* на рис. 11.10, б).

Рассмотренный неуправляемый тиристор имеет существенный недостаток: его открывание и закрытие возможно лишь при больших изменениях внешнего напряжения и тока.

Значительно чаще используют тиристоры, которые имеют управляющий электрод (рис. 11.11).

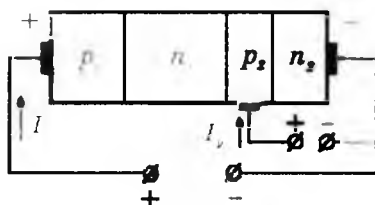


Рис. 11.11

Управляемый тиристор можно представить в виде эквивалентной схемы из двух транзисторов (рис. 11.12) (см. раздел 11.5).

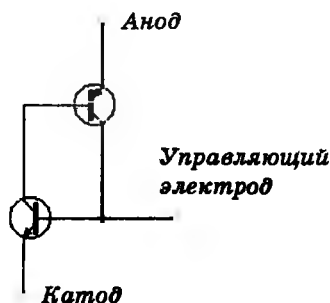


Рис. 11.12

Анод должен иметь положительный потенциал по отношению к катоду, а управляющий электрод оставаться свободным. *n-p-n* транзистор не пропускает ток, поскольку на его эмиттерный переход не подано напряжение прямого смещения (обеспечиваемое коллектором *p-n-p* транзистора или управляющим сигналом). А поскольку *n-p-n* транзистор не

пропускает ток, *p-n-p* транзистор также заперт (так как коллектор *n-p-n* транзистора обеспечивает смещение на базе *p-n-p* транзистора). При этих условиях ток от анода к катоду не течет.

Если на управляющий электрод подать положительное напряжение по отношению к катоду, эмиттерный переход *n-p-n* транзистора будет смещен в прямом направлении и *n-p-n* транзистор откроется. Это позволит течь току базы *p-n-p* транзистора и откроет его. Коллекторный ток *p-n-p* транзистора является током базы *n-p-n* транзистора. Оба транзистора будут поддерживать друг друга в проводящем состоянии, позволяя току течь непрерывно от анода к катоду. Процесс будет происходить даже в том случае, если управляющее напряжение приложено на короткий момент времени. Кратковременная подача управляющего напряжения переключает цепь в проводящее состояние, и она продолжает проводить ток даже при отключении управляющего напряжения. Ток анода ограничен только внешней цепью. Для переключения тиристора в непроводящее состояние необходимо уменьшить напряжение анод-катод до нуля. Это обеспечит запирающие оба транзистора, и они останутся запертыми до тех пор, пока опять не будет подано управляющее напряжение.

Тиристор включается положительным управляющим напряжением и выключается уменьшением напряжения анод-катод до нуля. Когда тиристор включен и проводит ток от анода к катоду, его проводимость в прямом направлении достаточно велика. Если изменить полярность напряжения катод-анод, то через цепь, проводимость которой резко уменьшится, будет течь только маленький ток утечки.

На рис. 11.13 изображено семейство вольтамперных характеристик управляемого тиристора при различных токах цепи управления.

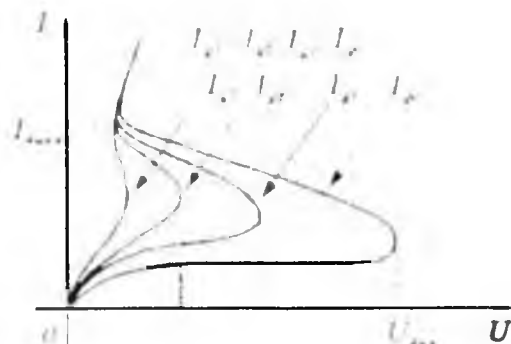


Рис. 11.13

Схематическое обозначение управляемого тиристора изображено на рис. 11.14.



Рис. 11.14

Схема включения тиристора показана на рис. 11.15. Переключатель используется для подачи и снятия управляющего напряжения.



Рис. 11.15

Резистор R_g используется для ограничения тока управляющего электрода. Напряжение между анодом и катодом обеспечивается источником переменного напряжения. Последовательно включенный

резистор R , используется для ограничения тока анод-катод во включенном состоянии. Без резистора R , через тиристор может течь слишком большой ток, способный повредить его.

Тиристоры используются главным образом для управления подачей мощности постоянного и переменного токов на различные типы нагрузок. Они могут быть использованы в качестве переключателей для включения и выключения цепей. Они также могут быть использованы для плавной регулировки мощности, подаваемой на нагрузку. При использовании тиристоров малый ток управляющего электрода может управлять большим током нагрузки.

Когда тиристор используется в цепи постоянного тока, не существует простого метода его выключения без снятия напряжения с нагрузки.

Когда тиристор используется в цепи переменного тока, он способен проводить ток только в течение половины каждого периода переменного тока, а именно в течение той половины, когда потенциал анода положителен по отношению к катоду. Когда ток управляющего электрода приложен постоянно, тиристор проводит постоянно. Когда ток управляющего электрода отсутствует в течение половины периода, тиристор выключается и остается выключенным до тех пор, пока ток управляющего электрода не будет подан снова. Необходимо заметить, что при этом на нагрузку подается только половина мощности. Тиристор можно использовать для управления током в течение обоих полупериодов каждого цикла, если выпрямить переменный управляющий ток перед подачей на тиристор.

Симистор – это двунаправленный управляемый тиристор. Он имеет такие же переключательные характеристики, как и обычный тиристор, но проводит переменный ток в обоих направлениях. Си-

симистор эквивалентен двум обычным тиристорам, включенным встречно-параллельно (рис. 11.16, а).

Поскольку симистор может управлять током, текущим в любом направлении, он широко используется для управления подачей переменного тока на различные типы нагрузок. Он может быть включен подачей тока на управляющий электрод и выключен уменьшением рабочего тока до величины, меньшей уровня удержания. На рис. 11.16 показаны упрощенная схема конструкции симистора и его эквивалентная схема.

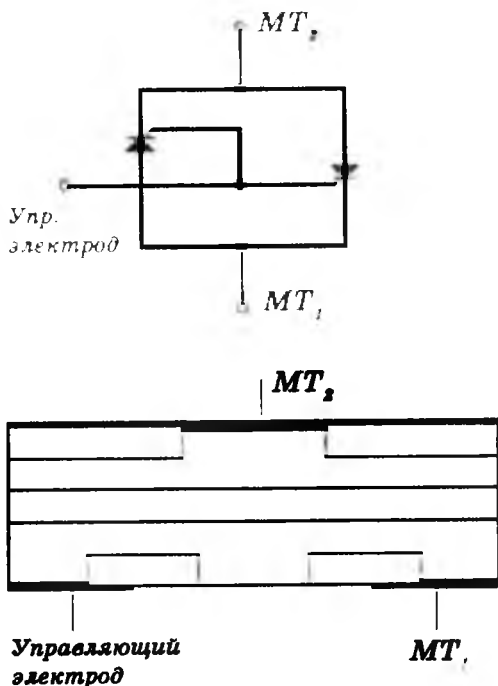


Рис. 11.16

Симистор является четырехслойным устройством типа *n-p-n-p*, соединенным параллельно с устройством типа *p-n-p-n* и рассчитанным на управление током,

текущим через управляющий электрод. Выводы входа и выхода обозначаются MT_1 и MT_2 . Эти выводы соединены с p - n -переходами на противоположных концах устройства. Вывод MT_1 представляет собой опорную точку, относительно которой измеряются напряжение и ток на управляющем электроде. Управляющий электрод соединен с p - n -переходом на том же конце устройства, что и MT_1 . От вывода MT_1 до вывода MT_2 сигнал должен пройти через последовательность слоев n - p - n - p или p - n - p - n . Схематическое обозначение симистора показано на рис. 11.17.



Рис. 11.17

Симисторы могут быть использованы в качестве переключателей переменного тока или для управления величиной мощности переменного тока, подаваемой в нагрузку. Симисторы способны передать в нагрузку полную мощность. Когда симистор используется для регулировки величины мощности подаваемой в нагрузку, необходимо специальное запускающее устройство для того, чтобы обеспечить работу симистора в течение заданного промежутка времени. Запускающее устройство необходимо потому, что симистор имеет неодинаковую чувствительность к токам управляющего электрода, текущим в противоположных направлениях.

По сравнению с обычными тиристорами симисторы обладают рядом недостатков. Симисторы могут управлять токами не более 25 А, тогда как обычные тиристоры могут управлять токами до 1400 А.

Максимальное напряжение для симисторов – 500 В, а для обычных тиристоров – 2 600 В. Симисторы рассчитаны на работу при низких частотах (от 50 до 400 Гц), тогда как обычные тиристоры могут работать на частотах до 30 000 Гц. Симисторы также имеют трудности при переключении мощности на индуктивной нагрузке.

На рис. 11.18 показан внешний вид наиболее распространенных тиристоров.

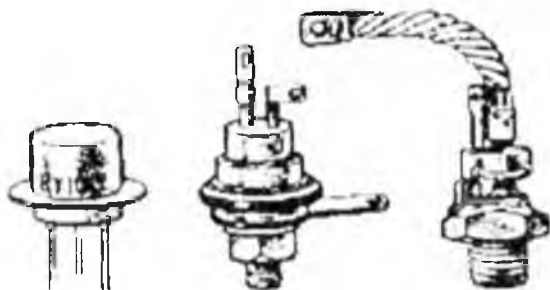


Рис. 11.18

11.5. Биполярные транзисторы

В 1948 г. Джон Бардин, Уолтер Браттейн и Уильям Шокли в лабораториях фирмы Bell изготовили первый работающий транзистор.

Наверное, ни одно из открытий современной физики не повлияло столь непосредственно на жизнь людей, как транзистор. Благодаря своим преимуществам перед электронной лампой транзистор совершил революцию в области электронных средств связи и обеспечил создание и широкое использование быстродействующих электронно-вычислительных машин с большим объемом памяти. Наиболее очевидные преимущества транзистора: он имеет малый объем; работая при меньших значениях на-

пряжений, не требует громоздких источников питания; у него отсутствует нагреваемый катод, требующий времени на разогрев и отвод тепла. И, наконец, еще одно важное свойство транзистора, которое особенно ценно при его применении в вычислительной технике – это малое количество потребляемой энергии в расчете на один бит информации. По некоторым оценкам, эта энергия сравнима с энергией, используемой нейронами головного мозга.

Транзистор – это устройство, состоящее из двух $p-n$ переходов, которое используется для управления электрическим током. Изменяя величину напряжения, приложенного к его электродам, можно управлять величиной тока через транзистор и использовать его для усиления, генерации или переключения.

Транзистор, как и диод, может быть изготовлен из германия или кремния, но кремний более популярен. Биполярный транзистор состоит из трех областей с чередующимся типом проводимости (по сравнению с двумя у диода). Эти три области могут быть расположены двумя способами.

В первом случае материал p -типа расположен между двумя слоями материала n -типа, образуя $n-p-n$ транзистор (рис. 11.19, а). Во втором случае слой материала n -типа расположен между двумя слоями материала p -типа, образуя $p-n-p$ транзистор (рис. 11.19, б).

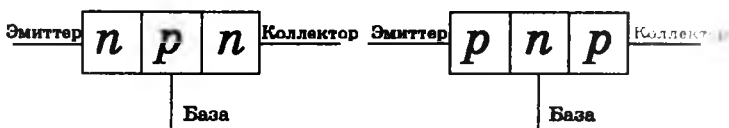


Рис. 11.19

У транзисторов обоих типов средняя область называется базой, а внешние области называются эмиттером и коллектором. Схематические обозначения транзисторов обоих типов показаны на рис. 11.20.

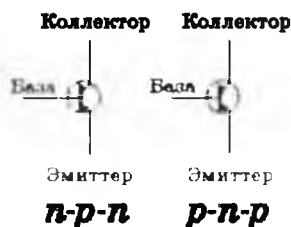
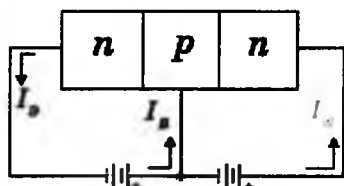


Рис. 11.20

Транзистор может использоваться различными способами, но основной его функцией является усиление сигналов.

Для того чтобы области эмиттера, базы и коллектора взаимодействовали должным образом, к транзистору должно быть правильно приложено напряжение. Напряжение, приложенное от внешнего источника э.д.с. к $p-n$ -переходу, называется смещением. При прямом смещении (плюс подан на p -область, а минус — на n -область), $p-n$ -переход открыт и ток через него (прямой ток) может достигать больших значений. При обратном смещении $p-n$ -переход закрыт, и ток через него (обратный ток) очень мал. В правильно смещенном транзисторе эмиттерный переход смещен в прямом направлении, а коллекторный переход — в обратном.



Правильно смещенный транзистор типа *n-p-n* показан на рис. 11.21.

Смещение в прямом направлении заставляет электроны течь с эмиттера *n-p-n* транзистора (напомним, что направление тока противоположно направлению движения электронов). При прямом смещении потенциал базы положителен по отношению к эмиттеру. Положительный потенциал притягивает электроны, создавая поток электронов из эмиттера. На электроны, притянутые базой, начинает влиять положительный потенциал, приложенный к коллектору. Большинство электронов притягивается к коллектору и к положительному выводу источника тока, создающего обратное смещение. Небольшая часть электронов поглощается областью базы и поддерживает небольшой поток электронов от базы. Для того чтобы это имело место, область базы должна быть предельно тонкой.

В правильно смещенном *p-n-p* транзисторе выводы источников тока необходимо поменять местами (рис. 11.22), и направление потока электронов изменится на противоположное.

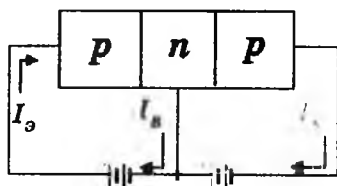


Рис. 11.22

Как и в диоде, в транзисторе существует потенциальный барьер. В транзисторе потенциальный барьер возникает у перехода эмиттер-база. Для того чтобы электроны могли проходить через этот переход, внешнее смещение должно превышать это напряжение. Величина внутреннего потенциального

барьера определяется типом используемого полупроводникового материала. Как и в диодах, величина внутреннего потенциального барьера составляет 0,3 В для германиевых транзисторов и 0,7 В для кремниевых.

К переходу коллектор-база транзистора также должен быть приложен положительный потенциал, достаточно высокий для того, чтобы притягивать большинство электронов, поставляемых эмиттером. Напряжение обратного смещения, приложенное к переходу коллектор-база, обычно намного выше напряжения прямого смещения, приложенного к переходу эмиттер-база, снабжающего электронами этот источник более высокого напряжения.

11.6. Полевые транзисторы

11.6.1. Полевые транзисторы с *p-n*-переходом

*Полевой транзистор с *p-n*-переходом* – это устройство, управляемое напряжением, в котором работают только основные носители. Эти транзисторы состоят из полупроводниковых материалов *n*- и *p*-типа и способны усиливать электронные сигналы, но их конструкция отличается от конструкции биполярных транзисторов и их работа основана на других принципах. Для того чтобы понять, как работают полевые транзисторы с *p-n*-переходом, необходимо знать их конструкцию.

Базой таких транзисторов является подложка, изготовленная из слаболегированного полупроводникового материала. Подложка может быть из материала *n*- или *p*-типа. *p-n*-переход в подложке изготовляется как методом диффузии, так и методом выращивания. Важную роль играет форма *p-n*-перехода. На рис. 11.23 показано сечение встроенной области в подложке.

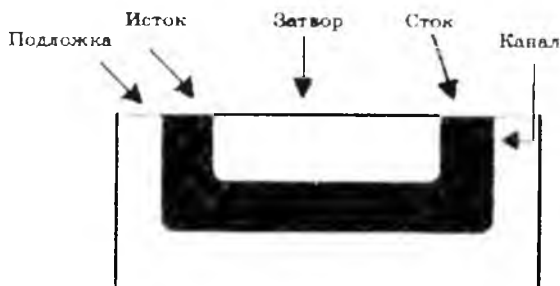
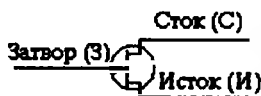


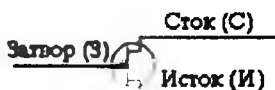
Рис. 11.23

U-образная область называется каналом, она утоплена по отношению к верхней поверхности подложки. Когда канал сделан из материала *n*-типа, в подложке из материала *p*-типа образуется полевой транзистор с каналом *n*-типа. Когда канал сделан из материала *p*-типа, в подложке из материала *n*-типа образуется полевой транзистор с каналом *p*-типа.

Полевой транзистор с *p-n*-переходом имеет три вывода (рис. 11.23). Один вывод соединен с подложкой и образует затвор (З). Выводы, соединенные с концами канала, образуют исток (И) и сток (С). Неважно, какой из выводов соединен со стоком, а какой с истоком, так как канал симметричен. Схематические обозначения для полевых транзисторов с *p*-каналом и с *n*-каналом показаны на рис. 11.24.



Полевой транзистор
с *p-n*-переходом и
каналом *n*-типа



Полевой транзистор
с *p-n*-переходом и
каналом *p*-типа

Рис. 11.24

Работа полевых транзисторов с p - n -переходом требует двух внешних источников смещения. Один из источников ($E_{си}$) подсоединяется между стоком и истоком, заставляя ток течь через канал. Другой источник ($E_{зи}$) подсоединяется между затвором и истоком. Он управляет величиной тока, протекающего через канал. Полярности напряжений смещения для полевых транзисторов с n -каналом и p -каналом показаны на рис. 11.25.

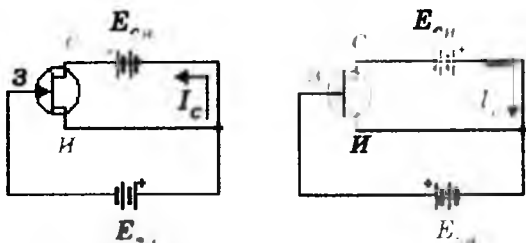


Рис. 11.25

Рассмотрим работу транзистора с n каналом. Источник тока $E_{си}$ подсоединяется таким образом, чтобы на истоке был отрицательный потенциал по отношению к стоку. Это обуславливает прохождение тока через канал, так как основными носителями в материале n -типа являются электроны. Ток, текущий от истока к стоку, называется *током стока* полевого транзистора (I_c). Канал служит сопротивлением для приложенного напряжения ($E_{си}$).

Напряжение затвор-исток ($E_{зи}$) подается таким образом, чтобы затвор имел отрицательный потенциал по отношению к истоку. Это обуславливает формирование обратно смещенного p - n -перехода между затвором и каналом и создает обедненный слой в окрестности p - n -перехода, который распространяется вдоль всей длины канала. Обедненный слой шире у стока, так как напряжение $E_{си}$ складывается с

напряжением $E_{зи}$, создавая более высокое напряжение обратного смещения, чем у истока.

Размером обедненного слоя управляет напряжение $E_{зи}$. При увеличении $E_{зи}$ толщина обедненного слоя увеличивается. При уменьшении $E_{зи}$ толщина обедненного слоя уменьшается. При увеличении толщины обедненного слоя резко уменьшается толщина канала. Это уменьшает величину тока, который в состоянии пройти через него. Таким образом, $E_{зи}$ можно использовать для управления током стока (I_c), который протекает через канал. Увеличение $E_{зи}$ уменьшает I_c .

При обычной работе входное напряжение прикладывается между затвором и истоком. Результирующим выходным током является ток стока (I_c). В полевом транзисторе с $p-n$ -переходом для управления выходным током используется входное напряжение. В биполярном транзисторе для управления выходным током используется не напряжение, а входной ток.

Поскольку переход затвор-исток смещен в обратном направлении, полевой транзистор с $p-n$ -переходом имеет очень высокое входное сопротивление. Если переход затвор-исток сместить в прямом направлении, через затвор потечет большой ток, что послужит причиной падения входного сопротивления и уменьшит усиление транзистора. Величина напряжения, которое требуется для уменьшения I_c до нуля, называется *напряжением отсечки затвор-исток* ($E_{зиотс}$). Это значение указывается производителем транзистора.

Напряжение сток-исток ($E_{си}$) управляет размером обедненного слоя. При увеличении $E_{си}$ увеличивается также I_c . При некотором значении $E_{си}$ величина I_c перестает расти, только незначительно увеличиваясь при дальнейшем увеличении $E_{си}$. Это

происходит потому, что при увеличении напряжения $E_{си}$ увеличивается разность потенциалов между затвором и стоком, что приводит к увеличению размера обедненного слоя со стороны стока и соответственно к увеличению сопротивления канала. Когда это имеет место, говорят, что I_C достиг насыщения. Значение $E_{си}$, при котором I_C достигает насыщения, называется *напряжением насыщения* (E_H). Величина E_H обычно указывается производителем при значении $E_{зи}$, равном нулю. При этом величина E_H близка к $E_{зистс}$.

Полевые транзисторы с p -каналом и с n -каналом имеют одинаковые характеристики. Основное различие между ними – в направлении тока стока (I_C) через канал. В полевом транзисторе с p -каналом полярность напряжений смещения ($E_{зи}$, $E_{си}$) противоположна полярностям этих напряжений для транзистора с каналом n -типа.

11.6.2. Полевые транзисторы с изолированным затвором обедненного типа

Полевые транзисторы с изолированным затвором не используют p - n -переход. Вместо него применяется металлический затвор, который электрически изолирован от полупроводникового канала тонким слоем окисла. Это устройство известно как *полевой транзистор на основе структуры металл-окисел-полупроводник* (МОП транзистор).

Существуют два типа таких транзисторов: устройства n -типа с n -каналами и устройства p -типа с p -каналами. Устройства n -типа с n -каналами называются устройствами *обедненного типа*, так как они проводят ток при нулевом напряжении на затворе. В устройствах обедненного типа электроны являются носителями тока до тех пор, пока их количество не уменьшится благодаря приложенному к затвору

смещению, так как при подаче на затвор отрицательного смещения ток стока уменьшается. Устройства p -типа с p -каналами называются устройствами *обогащенного типа*. В устройствах *обогащенного типа* поток электронов обычно отсутствует до тех пор, пока на затвор не подано напряжение смещения. Хотя полевые транзисторы *обедненного типа* с p -каналом и транзисторы *обогащенного типа* с n -каналом и существуют, они обычно не используются.

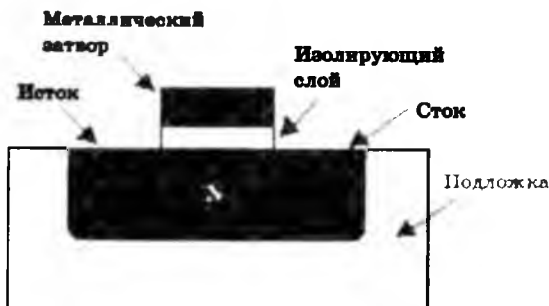


Рис. 11.26

На рис. 11.26 изображено сечение полевого транзистора *обедненного типа* с n -каналом. Он образован имплантацией n -канала в подложку p -типа. После этого на канал наносится тонкий изолирующий слой двуокиси кремния, оставляющий края канала свободными для подсоединения выводов — стока и истока. После этого на изолирующий слой наносится тонкий металлический слой. Этот металлический слой служит затвором. Дополнительный вывод подсоединяется к подложке. Металлический затвор изолирован от полупроводникового канала, так что затвор и канал не образуют p - n -пе-

реход. Металлический затвор используется для управления проводимостью канала так же, как и в полевом транзисторе с p - n -переходом.

Схематические обозначения МОП транзисторов обедненного типа с n -каналом и с p -каналом показаны на рис. 11.27. Заметим, что вывод затвора отделен от выводов стока и истока. Стрелка, направленная к подложке, указывает, что этот транзистор имеет канал n -типа. У транзисторов с каналом p -типа стрелка направлена от подложки. В некоторых МОП транзисторах подложка соединена внутри транзистора с истоком, и они не имеют отдельного вывода подложки.

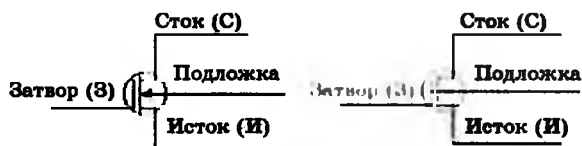


Рис. 11.27

На рис. 11.28 изображен полевой транзистор с изолированным затвором и каналом n -типа, к которому приложены напряжения смещения.

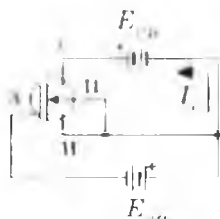


Рис. 11.28

Напряжение сток-исток ($E_{си}$) должно всегда прикладываться таким образом, чтобы сток имел положительный потенциал по отношению к истоку, как и в полевом транзисторе с $p-n$ -переходом. В канале n -типа основными носителями являются электроны, которые обеспечивают ток стока (I_c), протекающий от истока к стоку. Величиной тока стока управляет напряжение смещения ($E_{зи}$), приложенное между затвором и истоком, как и в полевом транзисторе с $p-n$ -переходом. Когда напряжение на затворе равно нулю, через устройство течет заметный ток стока, так как в канале имеется большое количество основных носителей (электронов). Когда на затворе появляется отрицательный потенциал по отношению к истоку, ток стока уменьшается вследствие обеднения основных носителей. Если отрицательный потенциал достаточно велик, то ток стока падает до нуля. Основное различие между полевыми транзисторами с $p-n$ -переходом и полевыми транзисторами с изолированным затвором состоит в том, что на затворе полевого транзистора с изолированным затвором может также быть и положительный потенциал по отношению к истоку. В полевом транзисторе с $p-n$ -переходом этого сделать нельзя, так как в этом случае $p-n$ -переход затвор-канал будет смещен в прямом направлении.

Когда напряжение на затворе полевого МОП транзистора обедненного типа положительно, изолирующий слой из двуокиси кремния предотвращает какой-либо ток через затвор. Входное сопротивление остается высоким и в канале появляется больше носителей (электронов), что увеличивает его проводимость. Положительное напряжение на затворе может быть использовано для увеличения тока стока МОП транзистора, а отрицательное напряжение на затворе может быть использовано для уменьше-

ния тока стока. Поскольку отрицательное напряжение подается на затвор для обеднения n -канала МОП транзистора, он называется устройством обедненного типа.

МОП транзисторы с p -каналом работают точно так же, как и транзисторы с n -каналом. Разница только в том, что основными носителями являются дырки. Вывод стока имеет отрицательный потенциал по отношению к истоку, и ток стока течет в противоположном направлении. Потенциал затвора может быть как положительным, так и отрицательным по отношению к истоку.

МОП транзисторы обедненного типа как с n -каналом, так и с p -каналом являются симметричными. Выводы стока и истока можно поменять местами. В специальных случаях затвор может быть смещен от области стока для того, чтобы уменьшить емкость между затвором и стоком. В случае, когда затвор смещен, выводы стока и истока нельзя поменять местами.

11.6.3. Полевые транзисторы с изолированным затвором обогащенного типа

МОП транзисторы обедненного типа являются открытыми в нормальном состоянии. Это означает, что они имеют заметный ток стока при напряжении затвор-исток, равном нулю. Это полезно во многих приложениях. Но полезно также иметь устройство, которое в нормальном состоянии закрыто, т. е. устройство, которое проводит ток только тогда, когда приложено напряжение $E_{зп}$ соответствующей величины.

На рис. 11.29 изображен МОП транзистор, который работает как устройство, закрытое в нормальном состоянии. Он подобен МОП транзистору обедненного типа, но не имеет проводящего канала.



Рис. 11.29

Вместо этого в подложку внедрены отдельные области стока и истока. На рисунке показана подложка *n*-типа и области стока и истока *p*-типа. Может быть также использована и обратная конфигурация. Расположение выводов такое же, как и у МОП транзистора обедненного типа.

МОП транзистор с *p*-каналом обогащенного типа должен быть смещен таким образом, чтобы на стоке был отрицательный потенциал по отношению к истоку. Когда к транзистору приложено только напряжение сток-исток (U_{DS}), ток стока отсутствует. Это обусловлено отсутствием проводящего канала между истоком и стоком. Когда на затвор подается отрицательный потенциал по отношению к истоку, дырки подтягиваются по направлению к затвору, где они создают канал *p*-типа, который позволяет протекать току от стока к истоку. При увеличении отрицательного напряжения на затворе размер канала увеличивается, что позволяет увеличить и ток стока. Увеличение напряжения на затворе позволяет увеличить ток стока.

Потенциал затвора МОП транзистора с p -каналом обогащенного типа может быть сделан положительным по отношению к истоку, и это не повлияет на работу транзистора. Ток стока в нормальном состоянии равен нулю и не может быть уменьшен подачей положительного потенциала на затвор.

Схематическое обозначение МОП транзистора с p -каналом обогащенного типа показано на рис. 11.30.



Рис. 11.30

Оно аналогично обозначению МОП транзистора с p -каналом обедненного типа, за исключением того, что области истока, стока и подложки разделены пунктирной линией. Это показывает, что транзистор в нормальном состоянии закрыт. Стрелка, направленная от подложки, обозначает канал p -типа.

МОП транзистор с p -каналом обогащенного типа с правильно поданными напряжениями смещения показан на рис. 11.31. Заметим, что $E_{си}$ делает сток МОП транзистора отрицательным по отношению к истоку. $E_{зи}$ также делает затвор отрицательным по отношению к истоку.

Заметный ток стока появляется только тогда, когда $E_{зи}$ увеличивается и на затвор подается отрицательный потенциал. Подложка обычно соединяется с истоком, но в отдельных случаях подложка и исток могут иметь различные потенциалы.

МОП транзисторы могут быть изготовлены с n -каналом обогащенного типа. Эти устройства рабо-

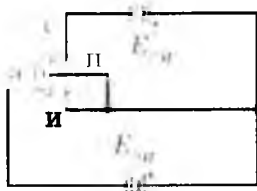


Рис. 11.31

тают с положительным напряжением на затворе так, что электроны притягиваются по направлению к затвору и образуют канал n -типа. В остальном они работают так же, как и устройства с каналом p -типа.

Схематическое обозначение МОП транзистора с n -каналом обогащенного типа показано на рис. 11.32. Оно аналогично обозначению устройства с p -каналом за исключением того, что стрелка направлена к подложке, обозначая канал n -типа. МОП транзистор с n -каналом обогащенного типа с правильно поданными напряжениями смещения показан на рис. 11.33.

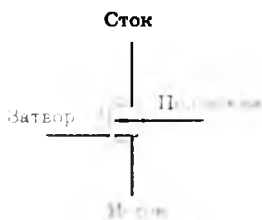


Рис. 11.32

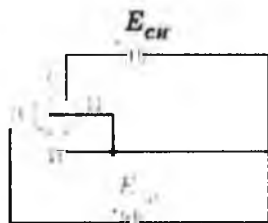


Рис. 11.33

МОП транзисторы с изолированным затвором обычно симметричны, как и полевые транзисторы с p - n -переходом. Следовательно, сток и исток обычно можно поменять местами.

11.6.4. Особенности работы с МОП транзисторами

При работе с МОП транзисторами необходимо соблюдать некоторые меры предосторожности. Важно проверить по данным производителя максимальное значение $E_{зи}$. Если $E_{зи}$ будет слишком большим, то тонкий изолирующий слой разрушится и выведет транзистор из строя. Изолирующий слой достаточно чувствителен и может быть поврежден статическим зарядом, появляющимся на выводах транзистора. Электростатические заряды с пальцев могут перейти на выводы МОП транзистора, когда вы касаетесь его руками или при монтаже.

Для того чтобы избежать повреждения, МОП транзисторы обычно поставляются с соединенными вместе выводами. Закорачивание осуществляется следующими методами: соединение выводом проволокой, упаковка транзистора в закорачивающее кольцо, запрессовка транзистора в проводящую пену, соединение нескольких транзисторов вместе, транспортировка в антистатических трубках и заворачивание транзисторов в металлическую фольгу.

Новейшие МОП транзисторы защищены с помощью стабилитронов, включенных внутри транзистора между затвором и истоком. Диоды защищают от статических разрядов и переходных процессов и избавляют от необходимости использования внешних закорачивающих устройств. В электронике *переходным процессом* называется временное изменение тока, вызванное изменением нагрузки, включением или выключением источника тока или импульсным сигналом.

С незащищенными МОП транзисторами можно без опаски работать при соблюдении следующих процедур:

1. До установки в цепь выводы транзистора должны быть соединены вместе.
2. Рука, которой вы будете брать транзистор, должна быть заземлена с помощью металлического браслета на запястье.
3. Жало паяльника должно быть заземлено.
4. МОП транзистор никогда не должен вставляться в цепь или удаляться из цепи при включенном питании.

11.7. Оптоэлектронные устройства

Полупроводники вообще, и полупроводниковые диоды в частности, широко используются в оптоэлектронике в качестве устройств, взаимодействующих с электромагнитным излучением (световой энергией) в видимом, инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах.

Существуют три типа устройств, которые взаимодействуют со светом:

- устройства для регистрации света,
- устройства для преобразования света,
- светоизлучающие устройства.

Полупроводниковый материал и использованная техника легирования определяют длину световой волны для каждого конкретного устройства.

11.7.1. Светочувствительные устройства

Старейшим из оптоэлектронных устройств является *фоторезистор*. Его внутреннее сопротивление изменяется при изменении интенсивности света. Изменение сопротивления не пропорционально интенсивности света. Фоторезисторы изготавливают из светочувствительных материалов, таких как сульфид кадмия (CdS) или селенид кадмия (CdSe).

Типичный фоторезистор устроен следующим образом. Светочувствительный материал нанесен на изолирующую подложку из стекла или керамики в виде S-образной фигуры для увеличения длины фоторезистора. Все это помещено в корпус с окошком, пропускающим свет. Его сопротивление может изменяться от нескольких сотен МОм до нескольких сотен Ом. Фоторезисторы применяются при низких интенсивностях света. Они могут выдерживать высокие рабочие напряжения до 200–300 В при малом потреблении мощности — до 300 мВт. Недостатком фоторезисторов является медленный отклик на изменения света.

На рис. 11.34 показано схематическое обозначение фоторезистора. Стрелки показывают, что это — светочувствительное устройство.



Рис. 11.34

Фоторезисторы используются для измерения интенсивности света в фотографическом оборудовании, в охранных датчиках, в устройствах автоматического открывания дверей, в различном тестирующем оборудовании для измерения интенсивности света.

Фотогальванический элемент (солнечный элемент) преобразует световую энергию непосредственно в электрическую энергию. Батареи солнечных элементов применяются главным образом для преобразования солнечной энергии в электрическую.

Солнечный элемент — это устройство на основе *p-n*-перехода, сделанное из полупроводниковых материалов. В большинстве случаев их делают из кремния. На металлическую подложку, служащую одним из контактов, наносится слой полупроводника

p-типа и *n*-типа, которые образуют *p-n*-переход. Сверху наносится металлическая пленка, служащая вторым контактом.

Свет, попадая на поверхность солнечного элемента, передает большую часть своей энергии атомам полупроводникового материала. Световая энергия выбивает валентные электроны с их орбит, создавая свободные электроны. Вблизи обедненного слоя электроны притягиваются материалом *n*-типа, создавая небольшое напряжение вдоль *p-n*-перехода. При увеличении интенсивности света это напряжение увеличивается. Однако не вся световая энергия, попадающая в солнечный элемент, создает свободные электроны. В действительности солнечный элемент — это довольно неэффективное устройство с максимальной эффективностью порядка 15%.

Солнечные элементы дают низкое выходное напряжение порядка 0,45 В при токе 50 мА. Их необходимо соединять в последовательно-параллельные цепи для того, чтобы получить от них желаемое выходное напряжение и ток.

Солнечные элементы применяются для измерения интенсивности света в фотографическом оборудовании, для декодирования звуковой дорожки в кинопроекторах и для зарядки батарей на космических спутниках.

Схематическое обозначение солнечного элемента показано на рис. 11.35. Положительный вывод обозначается знаком плюс (+).



Рис. 11.35

Фотодиод также использует $p-n$ -переход, и его устройство подобно устройству солнечного элемента. Он используется так же, как и фотосопротивление, в качестве резистора, сопротивление которого меняется при освещении. Фотодиоды – это полупроводниковые устройства, которые изготавливаются главным образом из кремния. Их делают двумя способами. Первый способ – это простой $p-n$ -переход. При другом способе между слоями p -типа и n -типа вставляется слой нелегированного полупроводника, образуя $p-i-n$ фотодиод.

Принципы работы фотодиода с $p-n$ -переходом такие же, как у солнечного элемента, за исключением того, что он используется для управления током, а не для создания его. К фотодиоду прикладывается обратное напряжение смещения, формирующее широкий обедненный слой. Когда свет попадает в фотодиод, он проникает в обедненный слой и создает там свободные электроны. Электроны притягиваются к положительному выводу источника смещения. Через фотодиод в обратном направлении течет малый ток. При увеличении светового потока возрастает число свободных электронов, что приводит к увеличению тока.

$p-i-n$ фотодиод имеет слой нелегированного материала между областями p и n . Это эффективно расширяет обедненный слой. Более широкий обедненный слой позволяет $p-i-n$ фотодиоду реагировать на свет с более низкими частотами. Свет с более низкими частотами имеет меньшую энергию и, следовательно, должен глубже проникать в обедненный слой перед созданием свободных электронов. Более широкий обедненный слой дает больше возможностей для создания свободных электронов. $p-i-n$ фотодиоды являются более эффективными во всех отношениях.

Благодаря слою нелегированного материала, *p-i-n* фотодиоды имеют более низкую собственную емкость. Это обеспечивает более быстрый отклик на изменения интенсивности света. Кроме того, изменение их обратного тока в зависимости от интенсивности является более линейным.

Преимуществом фотодиода является его быстрый отклик на изменения интенсивности света, самый быстрый из всех фоточувствительных устройств. Недостатком является низкая выходная мощность по сравнению с другими фоточувствительными устройствами.

Схематическое обозначение фотодиода показано на рис. 11.36. Способ включения фотодиода в цепь показан на рис. 11.37.



Рис. 11.36

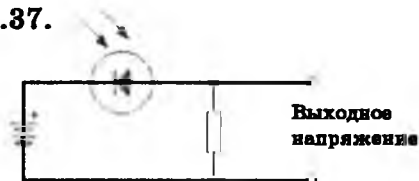


Рис. 11.37

Фототранзистор устроен подобно другим транзисторам с двумя *p-n*-переходами. Фототранзисторы могут давать больший выходной ток, чем фотодиоды. Их отклик на изменения интенсивности света не так быстр, как у фотодиодов. В данном случае за увеличение выходного тока приходится жертвовать скоростью отклика.

Фототранзисторы применяются для измерения скорости вращения различных устройств (фототахометры), для управления фотографической экспозицией, в противопожарных датчиках, в счетчиках предметов и в механических позиционерах. На рис. 11.38 изображено схематическое обозначение фототранзистора.



Рис. 11.88

11.7.2. Светоизлучающие устройства

Светоизлучающие устройства излучают свет при прохождении через них тока, преобразуя электрическую энергию в световую. *Светоизлучающий диод* (светодиод) – это наиболее распространенное полупроводниковое светоизлучающее устройство. Будучи полупроводниковым устройством, он имеет неограниченный срок службы ввиду отсутствия высокотемпературного нагрева, что служит причиной выхода из строя обычных ламп.

Любой p - n -переход может испускать свет, когда через него проходит ток. Свет возникает, когда свободные электроны рекомбинируют с дырками и лишняя энергия освобождается в виде света. Частота испускаемого света определяется типом полупроводникового материала, использованного при изготовлении диода. Обычные диоды не излучают свет потому, что они упакованы в непрозрачные корпуса.

Светодиоды – это просто диоды с p - n -переходом, которые излучают свет при прохождении через них тока. Этот свет виден потому, что светодиоды упакованы в полупрозрачный материал. Частота излучаемого света зависит от материала, использованного при изготовлении светодиода. Арсенид галлия (GaAs) излучает свет в инфракрасном диапазоне, который не воспринимается человеческим глазом.

Арсенид-фосфид галлия излучает видимый красный свет. Изменяя содержание фосфора, можно получить светодиоды, излучающие свет различной частоты.

На рис. 11.39 показано устройство светодиода. Слой типа p сделан тонким для того, чтобы не препятствовать прохождению света, излучаемого p - n -переходом.

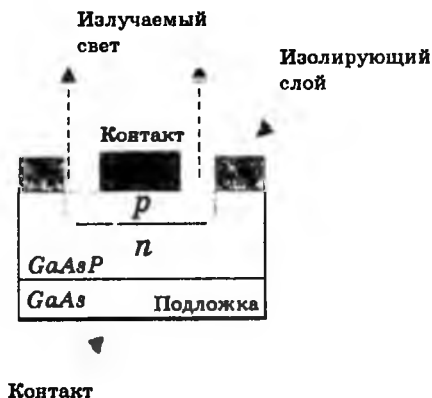


Рис. 11.39

После изготовления светодиод помещается в корпус, который рассчитан на максимальное пропускание света. Многие светодиоды содержат линзы, которые собирают свет и увеличивают его интенсивность. Корпус светодиода может также служить светофильтром для того, чтобы обеспечить излучение света определенной частоты.

Для того чтобы светодиод излучал свет, на него должно быть подано прямое смещающее напряжение, превышающее 1,2 В. Так как светодиод легко может быть поврежден большим током или напряжением, последовательно с ним включается резистор для ограничения тока.

Схематическое обозначение светодиода показано на рис. 11.40. На рис. 11.41 изображена схема вклю-

чения светодиода. Включенный последовательно резистор используется для ограничения прямого тока.



Рис. 11.40

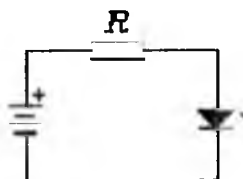


Рис. 11.41

Сборки светодиодов применяются для изготовления широко распространенных семисегментных индикаторов, используемых для отображения цифр.

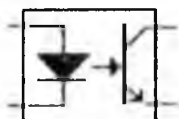


Рис. 11.42

На рис. 11.42 показано схематическое обозначение оптопары. Оптопара состоит из светодиода и фототранзистора. Оба устройства размещены в одном корпусе. Они связаны световым лучом, излучаемым светодиодом. Сигнал, поступающий на светодиод, может меняться, что в свою очередь изменяет интенсивность излучаемого света. Фототранзистор преобразует изменения света опять в электрическую энергию. Оптопара позволяет передавать сигнал от одной цепи к другой, обеспечивая высокую степень электрической изоляции их друг от друга.

11.8. Интегральные микросхемы

Транзисторы и другие полупроводниковые устройства благодаря их малым размерам и энергопот-

реблению сделали возможным уменьшение размеров электронных цепей. Следующим шагом в миниатюризации электронных устройств стали интегральные микросхемы, содержащие целые цепи. Целью разработки интегральных микросхем является получение устройства, выполняющего определенную функцию (например, усиление или переключение) и устраняющего разрыв между отдельными компонентами и цепями.

Интегральная микросхема (ИС) – это законченная электронная цепь в корпусе, не большем, чем стандартный маломощный транзистор. Цепь состоит из диодов, транзисторов, резисторов и конденсаторов. ИС производятся по такой же технологии и из таких же материалов, которые используются при производстве транзисторов и других полупроводниковых устройств.

Наиболее очевидным преимуществом ИС является ее малый размер. Она состоит из кристалла полупроводникового материала, размером примерно в один квадратный сантиметр. Благодаря малым размерам ИС находят широкое применение в военных и космических программах. Использование ИС превратило калькулятор из настольного в ручной инструмент, а компьютерные системы, которые раньше занимали целые комнаты, превратились в портативные модели.

Вследствие малых размеров ИС потребляют меньшую мощность и работают с более высокой скоростью, чем стандартные транзисторные цепи, так как благодаря прямой связи внутренних компонент уменьшается время перемещения электронов.

ИС более надежны, чем непосредственно связанные транзисторные цепи, поскольку в них все внутренние компоненты соединены непрерывно. Все эти компоненты сформированы одновременно, что

уменьшает вероятность ошибки. После того как ИС сформирована, она проходит предварительное тестирование перед окончательной сборкой.

Производство многих типов ИС унифицировано, что приводит к существенному снижению их стоимости. Производители предлагают полные и стандартные линии микросхем.

ИС уменьшают количество деталей, необходимых для конструирования электронного оборудования. Это уменьшает накладные расходы производителя, что в дальнейшем снижает цену электронного оборудования.

ИС имеют также некоторые недостатки. Они не могут работать при больших значениях токов и напряжений. Большие токи создают избыточное тепло, повреждающее устройство. Высокие напряжения пробивают изоляцию между различными внутренними компонентами. Большинство ИС являются маломощными устройствами, питающимися напряжением от 5 до 15 В и потребляющими ток, измеряющийся миллиамперами. Это приводит к потреблению мощности, меньшей, чем 1 Вт.

ИС содержат компоненты только четырех типов: диоды, транзисторы, резисторы и конденсаторы. Диоды и транзисторы – самые легкие для изготовления компоненты и самые миниатюрные. Резисторы более трудны в изготовлении, к тому же чем больше сопротивление резистора, тем больше он по размерам. Конденсаторы занимают больше места, чем резисторы, и также увеличиваются в размере по мере увеличения емкости.

ИС не могут быть отремонтированы. Это обусловлено тем, что внутренние компоненты не могут быть отделены друг от друга. Следовательно, проблема решается заменой микросхемы, а не заменой отдельных компонентов. Преимущество этого “недостат-

ка" состоит в том, что он сильно упрощает эксплуатацию систем высокой сложности и уменьшает время, необходимое персоналу для сервисного обслуживания оборудования.

Если все факторы собрать вместе, то преимущества перевесят недостатки. ИС уменьшают размеры, вес и стоимость электронного оборудования, одновременно увеличивая его надежность. По мере усложнения микросхем они стали способны выполнять более широкий круг операций.

ИС классифицируются согласно способу их изготовления. Наиболее широко используются следующие способы изготовления: монокристаллический, тонкопленочный, толстопленочный и гибридный.

Монокристаллические ИС изготавливаются так же, как и транзисторы, но включают несколько дополнительных шагов. Изготовление ИС начинается с круглой кремниевой пластины диаметром 8 – 10 см и около 0,25 мм толщиной. Эта пластина служит основой (подложкой), на которой формируется ИС. На одной подложке одновременно формируется до нескольких сотен ИС. Обычно все микросхемы на подложке одинаковы.

После изготовления ИС тестируются прямо на подложке. После тестирования подложка разрезается на отдельные чипы. Каждый чип представляет собой одну ИС, содержащую все компоненты и соединения между ними. Каждый чип, который проходит тест контроля качества, монтируется в корпус. Несмотря на то, что одновременно изготавливается большое количество ИС, далеко не все из них оказываются пригодными для использования. Эффективность производства характеризуют таким параметром, как выход. *Выход* – максимальное число пригодных ИС по сравнению с полным числом изготовленных.

Тонкопленочные ИС формируются на поверхности изолирующей подложки из стекла или керамики, обычно размером около 5 см². Компоненты (резисторы и конденсаторы) формируются с помощью очень тонких пленок металлов и окислов, наносимых на подложку. После этого наносятся тонкие полоски металла для соединения компонентов. Диоды и транзисторы формируются как отдельные полупроводниковые устройства и подсоединяются в соответствующих местах. Резисторы формируются нанесением тантала или никрома на поверхность подложки в виде тонкой пленки толщиной 0,0025 мм. Величина резистора определяется длиной, шириной и толщиной каждой полоски. Проводники формируются из металла с низким сопротивлением, такого как золото, платина или алюминий. С помощью этого процесса можно создать резистор с точностью $\pm 0,1\%$.

Тонкопленочные конденсаторы состоят из двух тонких слоев металла, разделенных тонким слоем диэлектрика. Металлический слой нанесен на подложку. После этого на металл наносится слой окисла, образуя диэлектрическую прокладку конденсатора. Она формируется обычно такими изолирующими материалами, как окись тантала, окись кремния или окись алюминия. Верхняя часть конденсатора создается из золота, тантала или платины, нанесенных на диэлектрик. Полученное значение емкости конденсатора зависит от площади электродов, а также от толщины и типа диэлектрика.

Чипы диодов и транзисторов формируются с помощью монолитной техники и устанавливаются на подложке. После этого они электрически соединяются с тонкопленочной цепью с помощью очень тонких проводников.

Материалы, используемые для компонентов и проводников, наносятся на подложку методом испарения в вакууме или методом напыления. В процессе испарения в вакууме материал достигает предварительно нагретой подложки, помещенной в вакуум, и конденсируются на ней, образуя тонкую пленку.

Процесс напыления происходит в газонаполненной камере при высоком напряжении. Высокое напряжение ионизирует газ, и материал, который должен быть напылен, бомбардируется ионами. Ионы выбивают атомы из напыляемого материала, которые затем дрейфуют по направлению к подложке, где и осаждаются в виде тонкой пленки. Для осаждения пленки нужной формы и в нужном месте используется маска. Другой метод состоит в покрытии всей подложки полностью и вырезании или вытравливании ненужных участков.

При толсто пленочном методе резисторы, конденсаторы и проводники формируются на подложке методом трафаретной печати: над подложкой размещается экран из тонкой проволоки, и металлизированные чернила делают сквозь него отпечаток. Экран действует как маска. Подложка и чернила после того нагреваются до температуры свыше 600°C для затвердевания чернил.

Толсто пленочные конденсаторы имеют небольшие значения емкости (порядка нескольких пФ). В тех случаях, когда требуются более высокие значения емкости, используются дискретные конденсаторы. Толсто пленочные компоненты имеют толщину $0,025$ мм. Толсто пленочные компоненты похожи на соответствующие дискретные компоненты.

Гибридные ИС формируются с использованием монолитных, тонко пленочных, толсто пленочных и дискретных компонентов. Это позволяет получать цепи высокой степени сложности, используя моно-

литные цепи, и в то же самое время использовать преимущества высокой точности и малых допусков, которые дает пленочная техника. Дискретные компоненты используются потому, что они могут работать при относительно высокой мощности.

ИС упаковываются в корпуса, рассчитанные на защиту их от влаги, пыли и других загрязнений. Наиболее популярным является корпус с двухрядным расположением выводов (DIP). Он производится нескольких размеров для того, чтобы соответствовать различным размерам ИС: микросхемам малой и средней степени интеграции, микросхемам большой степени интеграции (БИС) и сверхбольшим интегральным микросхемам (СБИС). Корпуса изготавливаются либо из керамики, либо из пластмассы. Пластмассовые корпуса дешевле и пригодны для большинства применений при рабочей температуре от 0°C до 70°C . Микросхемы в керамических корпусах дороже, но обеспечивают лучшую защиту от влаги и загрязнений. Кроме того, они работают в более широком диапазоне температур (от -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$). Микросхемы в керамических корпусах рекомендуются для использования в военной и аврокосмической технике, а также в некоторых отраслях промышленности.

Маленький 8-выводный корпус типа DIP используется для устройств с минимальным количеством входов и выходов. В нем располагаются главным образом монолитные интегральные микросхемы.

Плоские корпуса меньше и тоньше, чем корпуса типа DIP, и они используются в случаях, когда пространство ограничено. Они изготавливаются из металла или керамики и работают в диапазоне температур от -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$.

После того как интегральная микросхема заключена в корпус, ее тестируют, чтобы проверить, удов-

летворяет ли она всем требуемым параметрам. Тестирование проводится в широком диапазоне температур.

Вопросы для повторения

1. Чем отличается полупроводник от металла и диэлектрика?
2. Какие типы носителей тока существуют в полупроводниках?
3. Что такое легирование полупроводника?
4. Какие два типа примесей используются для легирования?
5. Что определяет тип проводимости (*n*-тип или *p*-тип) легированного полупроводника?
6. Что такое *p-n* переход и каково его основное свойство?
7. Нарисуйте вольтамперную характеристику *p-n* перехода.
8. Каково прямое падение напряжения для германиевых и для кремниевых диодов?
9. Что такое напряжение пробоя?
10. Нарисуйте схематическое обозначение диода и обозначьте выводы.
11. Какие методы изготовления *p-n* переходов вы знаете?
12. Каковы особенности работы стабилитрона?
13. Как стабилитрон включается в цепь?
14. Нарисуйте схему регулирующей цепи со стабилитроном и опишите ее работу.
15. Опишите структуру тиристора.
16. Нарисуйте вольтамперную характеристику управляемого тиристора и опишите его работу.
17. Нарисуйте семейство вольтамперных характеристик управляемого тиристора.
18. Опишите структуру симистора.
19. Для чего используются тиристоры?
20. Как устроен транзистор?

21. Какие два типа биполярных транзисторов существуют?
22. Как называются электроды биполярного транзистора?
23. Нарисуйте схематические обозначения *n-p-n* и *p-n-p* транзисторов.
24. Как правильно подать напряжения смещения на *n-p-n* и *p-n-p* транзисторы?
25. Для чего используются транзисторы?
26. Чем конструкция полевого транзистора с *p-n* переходом отличается от конструкции биполярного транзистора?
27. Нарисуйте схематические обозначения полевых транзисторов с *p-n* переходом с *p*-каналом и с *n*-каналом и обозначьте их выводы.
28. Нарисуйте схемы подачи смещения на полевые транзисторы с *p-n* переходом с *p*-каналом и с *n*-каналом.
29. Чем отличается конструкция МОП транзистора от конструкции полевого транзистора с *p-n* переходом?
30. Опишите, как происходит управление током в полевом МОП транзисторе.
31. Нарисуйте схематические обозначения МОП транзисторов обедненного типа с *p*-каналом и с *n*-каналом и обозначьте их выводы.
32. Чем МОП транзисторы обедненного и обогащенного типа отличаются друг от друга?
33. Нарисуйте схематические обозначения МОП транзисторов обогащенного типа с *p*-каналом и с *n*-каналом и обозначьте их выводы.
34. Перечислите правила, которые должны соблюдаться при работе с незащищенными МОП транзисторами.
35. Как устроен и как работает фоторезистор?
36. Как устроен и как работает солнечный элемент?
37. В чем разница между двумя типами фотодиодов?
38. В чем достоинство фототранзистора по сравнению с фотодиодом?
39. Нарисуйте схематические обозначения фоторезистора, солнечного элемента, фотодиода и фототранзистора.
40. Чем светодиод отличается от обычного диода?

41. Как корпус светодиода может усилить излучаемый свет?
42. Нарисуйте схематическое обозначение светодиода.
43. Каково устройство и назначение оптопары?
44. Что такое интегральная микросхема?
45. Какие компоненты могут быть включены в интегральные микросхемы?
46. Какие методы используются для изготовления интегральных микросхем?
47. Какие материалы используются для корпусов интегральных микросхем?

Глава 12. Основы электроники

12.1. Основные схемы выпрямления переменного тока

Одним из главных применений полупроводниковых диодов является выпрямление переменного тока. Выпрямитель служит для преобразования переменного напряжения в постоянное. Выпрямленное напряжение еще содержит переменные составляющие, которые называются пульсациями. От пульсаций избавляются с помощью сглаживающих фильтров.

Для обеспечения неизменной величины выходного напряжения используется стабилизатор напряжения. Стабилизатор напряжения удерживает выходное напряжение на постоянном уровне.

Основными параметрами, характеризующими выпрямители, являются: номинальное среднее выпрямленное напряжение U_0 , номинальный средний выпрямленный ток I_0 и коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения k_n .

Коэффициентом пульсаций k_n называется отношение амплитуды первой гармоники выпрямленного напряжения к среднему значению выпрямленного напряжения.

Основными параметрами, характеризующими диоды в выпрямителях, являются: среднее значение прямого тока, максимальное значение обратного напряжения и рассеиваемая мощность.

Трансформаторы, работающие в выпрямителях, характеризуются действующими значениями токов и напряжений первичной и вторичной обмоток и номинальной мощностью.

Наиболее распространены три основные схемы выпрямителей: однополупериодная, двухполупериодная и мостовая.

Схема *однополупериодного выпрямителя* изображена на рис. 12.1, где T – трансформатор, VD – полупроводниковый диод, а R – нагрузка.

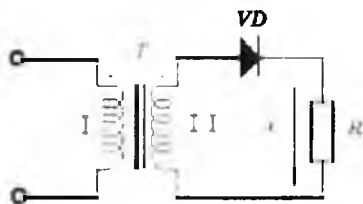


Рис. 12.1

Когда на верхнюю часть вторичной обмотки подан положительный полупериод переменного тока, на диод подается прямое напряжение, и он пропускает его, а когда отрицательный, то диод заперт. Через нагрузку протекает пульсирующий прерывистый ток (рис. 12.2).

Сопротивление R_D диода непостоянно: оно определяется крутизной вольтамперной характеристики в каждой точке. Однако при включении последовательно с диодом нагрузки R_n , сопротивление этой цепи становится равным $R_D + R_n$, и характеристику можно считать линейной (динамическая характеристика).

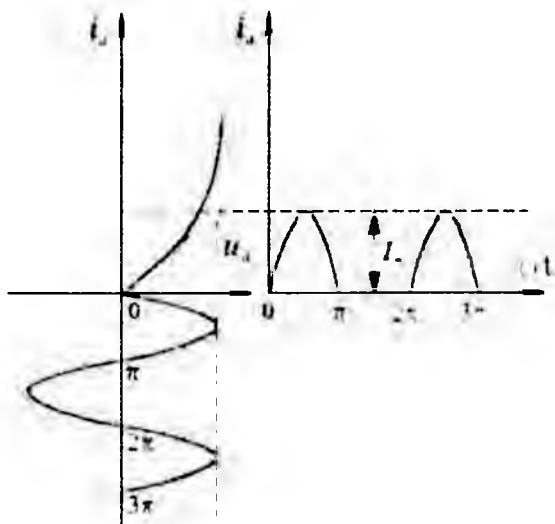


Рис. 12.2

Среднее за период значение тока, выпрямленного однополупериодным выпрямителем

$$I_0 = \frac{I_m}{\pi}, \quad (12.1)$$

где I_m — амплитуда тока, а среднее постоянное напряжение на нагрузке

$$U_0 = I_0 R_n = \frac{U_m}{\pi} - I_0 R_0. \quad (12.2)$$

Без нагрузки ($I_0 = 0$) напряжение на зажимах выпрямителя будет равно среднему за период значению положительной волны синусоиды:

$$U_0 = \frac{U_m}{\pi} = 0,318U_m = 0,45U, \quad (12.3)$$

где U – действующее значение переменного напряжения. При увеличении тока нагрузки напряжение на ней уменьшается на величину падения напряжения на диоде ($I_0 R_d$).

Во время отрицательного полупериода, когда диод закрыт, он находится под напряжением вторичной обмотки трансформатора, поэтому наибольшее обратное напряжение, действующее на диод,

$$U_{обр} = U_m = \pi U_0. \quad (12.4)$$

Мы видим, что обратное напряжение на диоде более чем в 3 раза превышает выпрямленное напряжение на нагрузке.

Однополупериодная схема очень редко используется в современных выпрямителях, поскольку вторичная обмотка трансформатора работает только половину периода, и поэтому габаритная мощность трансформатора должна превышать мощность выпрямленного тока примерно в 3 раза. Кроме того, выпрямленное напряжение имеет очень высокий коэффициент пульсаций, что затрудняет его сглаживание.

На рис. 12.3 изображена *двухполупериодная схема*, где T – трансформатор с отводом от середины вторичной обмотки, VD_1 и VD_2 – полупроводниковые диоды, а R – нагрузка.

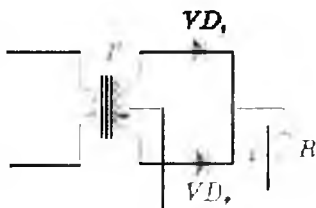


Рис. 12.3

Эту схему можно рассматривать как две самостоятельные однополупериодные схемы, имеющие об-

щю нагрузку. В ней диоды VD_1 и VD_2 оказываются открытыми в разные половины периода переменного напряжения, и поэтому ток через нагрузку R протекает в обе половины периода, пульсируя с двойной частотой (рис. 12.4).

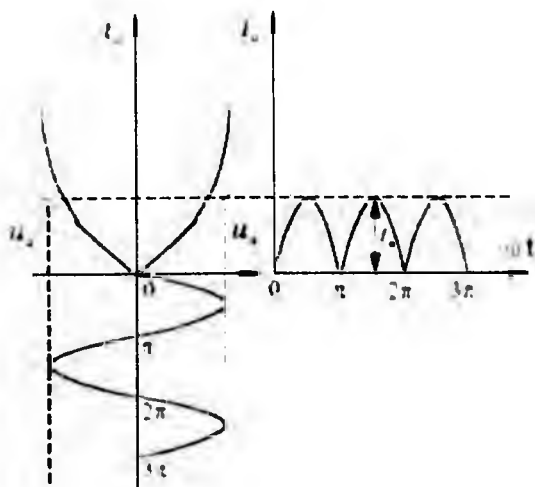


Рис. 12.4

Каждый диод здесь работает как в однополупериодной схеме. Токи диодов складываются, поэтому постоянные составляющие тока и напряжения

$$I_0 = \frac{2I_m}{\pi}; \quad (12.5)$$

$$U_0 = I_0 R_n = \frac{2U_m}{\pi} - I_0 R_0. \quad (12.6)$$

Из выражения (12.6) следует, что в отсутствие нагрузки напряжение на выходе двухполупериодного выпрямителя вдвое больше напряжения на выходе однополупериодного выпрямителя.

В двухполупериодной схеме максимальное обратное напряжение, действующее на каждый диод, на-

ходящийся в закрытом состоянии, равно сумме амплитуд напряжений обеих половин вторичной обмотки:

$$U_{\text{обр}} = 2U_m = 2 \frac{\pi U_0}{2} = \pi U_0 = 3,14 U_0. \quad (12.7)$$

Ток, протекающий через каждый диод, равен:

$$I_{\text{д}} = \frac{I_m}{2} = \frac{\pi I_0}{4} = 0,785 I_0, \quad (12.8)$$

т. е. по сравнению с однополупериодной в двухполупериодной схеме через каждый диод протекает вдвое меньший ток. Коэффициент пульсаций в двухполупериодной схеме значительно ниже.

Двухполупериодная схема довольно часто используется на практике. Ее недостатками являются: необходимость отвода от середины вторичной обмотки трансформатора и неполное использование вторичной обмотки трансформатора по напряжению. Эти недостатки устранены в мостовой схеме.

Мостовая схема выпрямления изображена на рис. 12.5 и состоит из трансформатора T и четырех диодов: $VD_1 - VD_4$.

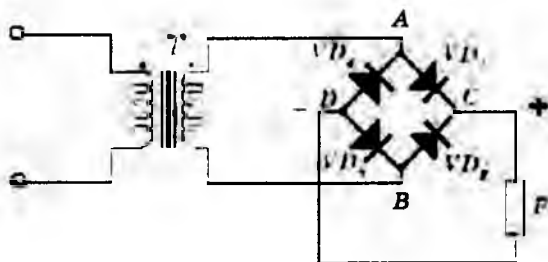


Рис. 12.5

Диагональ AB моста подключена к вторичной обмотке трансформатора, а диагональ CD – к нагрузке. Полярность напряжения на вторичной обмотке

изменяется каждую половину периода, в результате чего при более высоком потенциале точки A (+) по сравнению с потенциалом точки B (-) ток проходит в течение полупериода $A \rightarrow VD_1 \rightarrow C \rightarrow R \rightarrow D \rightarrow VD_3 \rightarrow B \rightarrow A$, а в следующий полупериод по пути $B \rightarrow VD_2 \rightarrow C \rightarrow R \rightarrow D \rightarrow VD_4 \rightarrow A \rightarrow B$.

Таким образом, выпрямленный ток идет через нагрузку R в течение всего периода переменного тока, поэтому мостовая схема является двухполупериодной.

В мостовой схеме выпрямленный ток и напряжение имеют такую же форму, как и в двухполупериодной схеме со средней точкой, поэтому согласно (12.5) значение выпрямленного тока

$$I_0 = \frac{2I_m}{\pi}$$

а выпрямленного напряжения согласно (12.6):

$$U_0 = I_0 R_n = \frac{2U_m}{\pi} = I_0 R_n$$

Без нагрузки ($I_0 = 0$) напряжение на зажимах выпрямителя

$$U_0 = \frac{2U_m}{\pi}$$

Особенностью мостовой схемы является отсутствие во вторичной обмотке трансформатора отвода от ее середины, поэтому для получения одного и того же значения выпрямленного напряжения по сравнению со схемой с отводом от середины вторичной обмотки в мостовой схеме требуется обмотка с вдвое меньшим числом витков. Вследствие этого обратное напряжение, действующее на каждый диод, в два раза меньше, чем в схеме с отводом от середины вторичной обмотки:

$$U_{\text{обр}} = U_m = 1,57 U_{\text{обр}} \quad (12.9)$$

Действующее значение тока, протекающего через диод,

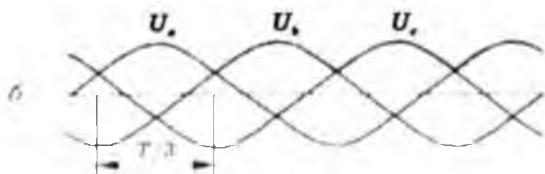
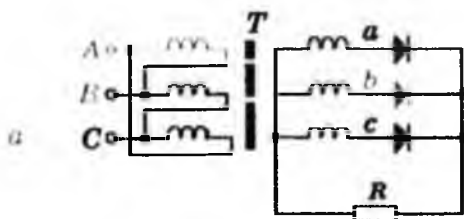
$$I = \frac{\pi I_0}{4} = 0,785 I_0$$

В мостовой схеме ток через каждый диод идет только в течение одного полупериода, тогда как через вторичную обмотку трансформатора – в течение всего периода. Действующее значение тока, протекающего через вторичную обмотку,

$$I = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = \frac{\pi I_0}{2\sqrt{2}} = 1,11 I_0. \quad (12.10)$$

Частота пульсаций и коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения в мостовой схеме такие же, как и в схеме с отводом от середины вторичной обмотки.

Рассмотрим теперь трехфазные схемы выпрямления. Простейшая *трехфазная схема выпрямления тока с нейтральной точкой* изображена на рис. 12.6а.



В этой схеме первичные обмотки трехфазного трансформатора соединяются звездой или треугольником, а вторичные – звездой, причем в каждую вторичную обмотку включено по диоду. В этом случае в каждый момент выпрямленный ток проходит только через тот диод, анод которого соединен с зажимом обмотки, имеющим наибольший положительный потенциал по отношению к нейтральной точке трансформатора. Поэтому выпрямленное напряжение будет изменяться по кривой, являющейся огибающей положительных полувольт фазных напряжений вторичных обмоток трансформатора (рис. 12.6, б). Переключение диодов происходит в моменты, соответствующие пересечению положительных полусинусоид напряжения. В нагрузке R_n токи, проходящие через три диода, суммируются.

Среднее значение выпрямленного напряжения в этой схеме

$$U_0 = 1,17U_\phi, \quad (12.11)$$

а среднее за период значение выпрямленного тока, проходящего через каждый диод,

$$I_0 = \frac{I_0}{3}. \quad (12.12)$$

Обратное напряжение, действующее на каждый диод, равно амплитуде линейного напряжения, действующего в системе вторичных обмоток трансформатора, соединенных звездой, поскольку диоды подключены анодами к каждой из фаз, а катодами к другой фазе через открытый диод:

$$U_{\text{обр}} = \sqrt{3}\sqrt{2}U_\phi = 2,09U_0.$$

Существенным недостатком этой схемы является то, что проходящие только через вторичные обмотки токи одного направления (выпрямленный ток) создают во взаимно связанных стержнях трехфаз-

ного трансформатора дополнительный постоянный магнитный поток. Чтобы не допустить насыщения магнитной системы за счет этого дополнительного потока, приходится увеличивать сечение стержней и габариты трансформатора. Трехфазную схему выпрямления с нейтральной точкой применяют только в маломощных силовых установках.

Мостовая трехфазная схема выпрямления переменного тока изображена на рис. 12.7. В ней сочетаются принципы мостовой схемы и схемы многофазного выпрямления. В этой схеме нулевая точка трансформатора для выпрямления не нужна и поэтому первичные и вторичные обмотки могут быть соединены как звездой, так и треугольником.

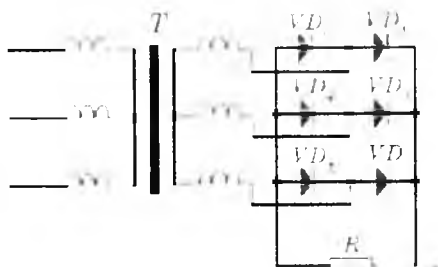


Рис. 12.7

Шесть диодов образуют две группы – нечетную VD_1, VD_3 и VD_5 и четную VD_2, VD_4 и VD_6 . У нечетной группы катоды соединены вместе и служат точкой вывода выпрямителя с положительным потенциалом, а у четной группы – аноды соединены вместе и служат точкой вывода с отрицательным потенциалом. При работе этой схемы выпрямляются обе полуволны переменных напряжений всех вторичных обмоток трансформатора, благодаря чему пульсации выпрямленного напряжения значительно уменьшаются. В схеме на рис. 12.7 в каждый

момент работает тот диод нечетной группы, у которого анод в этот момент имеет наибольший положительный потенциал, а вместе с ним тот диод четной группы, у которого катод имеет наибольший по абсолютной величине отрицательный потенциал. Выпрямленное напряжение будет изменяться по огибающей с двойной частотой пульсаций (рис. 12.8).

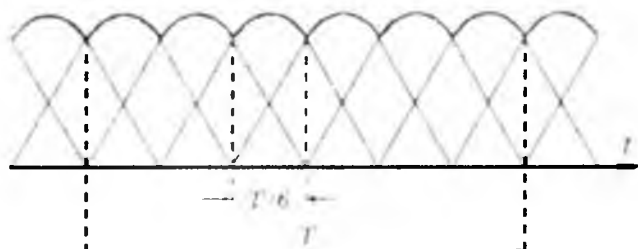


Рис. 12.8

Среднее значение выпрямленного напряжения в этой схеме

$$U_0 = 1,35U_n = 2,34U_\phi. \quad (12.13)$$

Средний ток через диод $I_D = I_0 / 3$, причем этот ток проходит через два последовательно включенных диода. Обратное напряжение, действующее на каждый диод, здесь также равно амплитудному значению линейного напряжения:

$$U_{обр} = \sqrt{2}U_n = \sqrt{6}U_\phi = 1,045U_0. \quad (12.14)$$

В мощных выпрямителях в основном используется мостовая трехфазная схема. Она получила широкое применение в управляемых выпрямителях, в которых, регулируя моменты открывания и закрывания диодов (тиристоров), можно в широких пределах регулировать среднее значение выпрямленного тока.

12.2. Сглаживающие фильтры

Рассмотренные схемы выпрямления переменного тока позволяют получать выпрямленное, но пульсирующее напряжение. Для питания электронных приборов пульсирующее напряжение непригодно: оно создает фон переменного тока, вызывает искажения сигналов и приводит к неустойчивой работе приборов. Для устранения пульсаций (сглаживания) применяют сглаживающие фильтры.

Сглаживающий фильтр состоит из реактивных элементов: конденсаторов и катушек индуктивности (дресселей). Сущность работы сглаживающего фильтра состоит в разделении пульсирующего тока $i(t)$ на постоянную I_0 и переменную i_{Δ} составляющие (рис. 12.9). Постоянная составляющая направляется в нагрузку, а нежелательная переменная замыкается через конденсатор, минуя нагрузку.

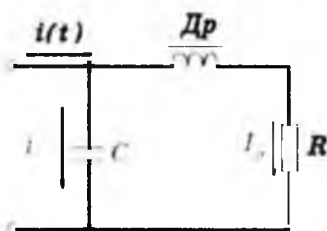


Рис. 12.9

Физическая сущность работы в фильтре конденсатора и дросселя состоит в том, что конденсатор (обычно большой емкости), подключенный параллельно нагрузке, заряжается при нарастании импульсов выпрямленного напряжения и разряжается при их убывании, сглаживая тем самым его пульсации. Дроссель, наоборот, при нарастании импульсов

выпрямленного тока в результате действия ЭДС самоиндукции задерживает рост тока, а при убывании импульсов задерживает его убывание, сглаживая пульсации тока в цепи нагрузки. С другой стороны, конденсатор и дроссель можно рассматривать как некие резервуары энергии. Они запасают ее, когда ток в цепи нагрузки превышает среднее значение, и отдают, когда ток стремится уменьшиться ниже среднего значения. Это и приводит к сглаживанию пульсаций.

Рассмотрим несколько подробнее емкостной фильтр, в котором на выходе двухполупериодного выпрямителя параллельно нагрузке R включен конденсатор C (рис. 12.10).

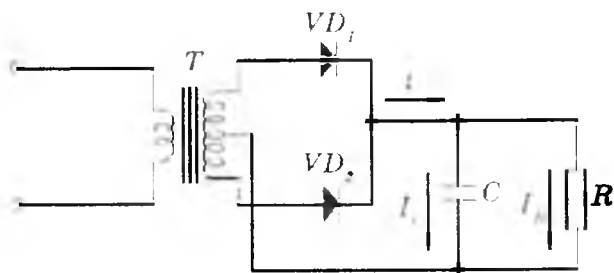


Рис. 12.10

При возрастании выпрямленного напряжения (при открытом диоде VD_1) конденсатор зарядится (рис. 12.11, а), а при убывании выпрямленного напряжения полярность напряжения на диоде изменится на противоположную и диод закроется, отключив вторичную обмотку трансформатора от нагрузки. Ток через диод будет иметь форму короткого импульса (рис. 12.11, б).

Когда входной сигнал начинает падать в отрицательном направлении, конденсатор разряжается через нагрузку. Скорость разряда конденсатора зависит от постоянной времени RC , а следовательно, от

сопротивления нагрузки. Постоянная времени разряда велика по сравнению с периодом переменного тока. Следовательно, период заканчивается раньше, чем конденсатор может разрядиться. Поэтому после первой четверти периода ток через нагрузку поддерживается разряжающимся конденсатором. Как только конденсатор начинает разряжаться, напряжение на нем уменьшается. Однако до того как конденсатор полностью разрядится, начнется следующий период синусоиды. На аноде диода опять появится положительный потенциал, что позволит ему проводить ток. Конденсатор зарядится снова, и цикл повторится. В результате пульсации напряжения сгладятся и выходное напряжение фактически повысится.

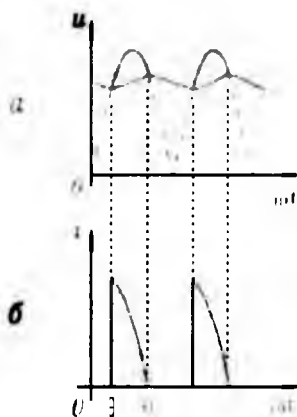


Рис. 12.11

Чем больше емкость конденсатора, тем больше постоянная времени RC . Это приводит к более медленному разряду конденсатора, что повышает выходное напряжение. Наличие конденсатора позволяет диоду в цепи проводить ток в течение короткого периода времени. Когда диод не проводит, конденсатор обеспечивает нагрузку током. Если нагрузка

потребляет большой ток, то должен использоваться конденсатор большой емкости.

Целью фильтрующего конденсатора является сглаживание пульсаций постоянного напряжения выпрямителя. Качество работы фильтра определяется величиной пульсаций, остающихся в постоянном напряжении. Величину пульсаций можно уменьшить путем использования конденсатора большей емкости или путем увеличения сопротивления нагрузки. Обычно сопротивление нагрузки определяется при расчете цепи. Следовательно, емкость фильтрующего конденсатора определяется допустимой величиной пульсаций.

Необходимо отметить, что фильтрующий конденсатор создает дополнительную нагрузку на диоды, используемые в выпрямителе. Конденсатор заряжается до максимального значения напряжения вторичной обмотки и удерживает это значение в течение всего цикла входного напряжения. Когда диод становится смещенным в обратном напряжении, он запирается и максимальное отрицательное напряжение попадает на анод диода. Фильтрующий конденсатор удерживает максимальное положительное напряжение на катоде диода. Следовательно, разность потенциалов на диоде в два раза превышает максимальное значение напряжения вторичной обмотки. Для выпрямителя должен быть выбран диод, выдерживающий такое напряжение.

Максимальное напряжение, которое может выдерживать диод, будучи смещенным в обратном направлении, называется *импульсным обратным напряжением диода*. Импульсное обратное напряжение диода, выбранного для выпрямителя, должно быть выше, чем удвоенное максимальное напряжение вторичной обмотки. В идеале диод должен работать при 80% номинального значения обратного напряжения

для того, чтобы выдержать изменения входного напряжения. Это касается как однополупериодного, так и двухполупериодного выпрямителя. Но это не так для мостового выпрямителя.

К диодам в мостовом выпрямителе никогда не прикладывается напряжение, большее, чем максимальное значение напряжения вторичной обмотки, поскольку в каждом полупериоде работают по два последовательно включенных диода. Возможность использования диодов с более низкими значениями импульсного обратного напряжения является еще одним преимуществом мостового выпрямителя.

Следует отметить, что пиковое значение тока, протекающего через диод, может во много раз превышать ток нагрузки, что опасно для целостности диода. В реальной цепи ток через диод возрастает не мгновенно и передний фронт импульса тока также закруглен.

Наиболее распространенными сглаживающими фильтрами в выпрямителях электронных приборов являются П-образные LC -фильтры (рис. 12.12, а). В них постоянная составляющая выпрямленного тока, свободно проходящая через дроссель Dp , попадает затем в нагрузку и замыкается через трансформатор. Переменные составляющие, замыкаясь через большие емкости C_1 и C_2 , в нагрузку не проходят.

При небольших токах нагрузки успешно работает Г-образный фильтр (рис. 12.12, б), а при малых токах нагрузки в качестве сглаживающего фильтра достаточно включить конденсатор (рис. 12.12, в), что и делается в переносных радиоприемниках и магнитолах. Во многих случаях дроссель заменяют резистором, что несколько снижает качество фильтрации, но зато значительно удешевляет фильтр (рис. 12.12, г, д). В наиболее ответственных случаях сглаживающий фильтр делают многозвенным, состоя-

щим из нескольких П-образных или Г-образных LC или RC фильтров (рис. 12.12, е).

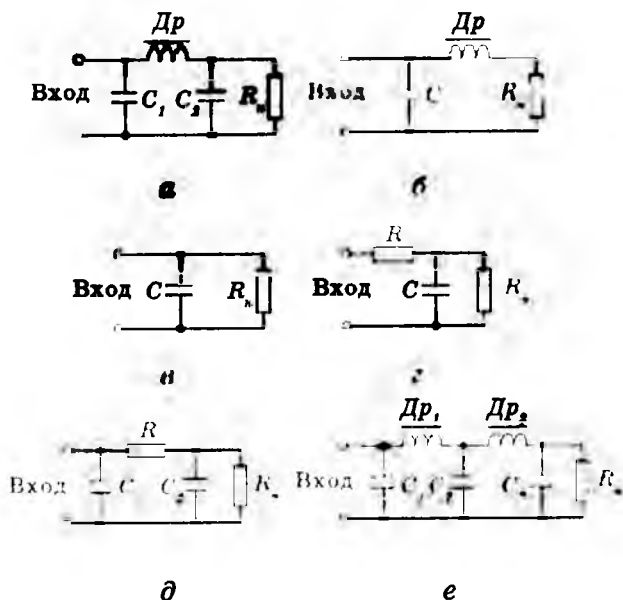


Рис. 12.12

12.3. Стабилизаторы напряжения

Выходное напряжение выпрямителя может изменяться по двум причинам. Во-первых, может изменяться входное напряжение выпрямителя, что приводит к увеличению или уменьшению выходного напряжения. Во-вторых, может изменяться сопротивление нагрузки, что приводит к изменению потребляемого тока.

Многие электрические цепи рассчитаны на работу при определенном напряжении. Изменения напряжения могут влиять на работу цепи. Следовательно, выпрямитель должен обеспечивать выходное напряжение постоянной величины независимо от

изменения нагрузки или входного напряжения. Для того чтобы этого добиться, после сглаживающего фильтра ставят стабилизатор напряжения.

Существует два основных типа стабилизаторов напряжения: параллельные и последовательные. Их названия определяются методом их соединения с нагрузкой. Параллельный стабилизатор подключается к нагрузке параллельно. Последовательный стабилизатор подсоединяется к нагрузке последовательно. Последовательные стабилизаторы более популярны, чем параллельные, так как они более эффективны и рассеивают меньшую мощность. Последовательный стабилизатор также работает в качестве управляющего устройства, защищая источник питания от короткого замыкания в нагрузке.



Рис. 12.13

На рис. 12.13 показана простая регулирующая цепь на основе стабилитрона. Это параллельный стабилизатор. Стабилитрон соединен последовательно с резистором. Входное постоянное напряжение прикладывается к стабилитрону и резистору и смещает стабилитрон в обратном направлении. Резистор позволяет протекать малому току и поддерживать стабилитрон в области пробоя. Входное напряжение должно быть выше, чем напряжение стабилизации стабилитрона. Падение напряжения на стабилитроне равно напряжению стабилизации стабилитрона. Падение напряжения на резисторе равно разности между входным напряжением и напряжением стабилизации стабилитрона.

Цепь, изображенная на рис. 12.13, обеспечивает постоянное выходное напряжение при изменениях входного напряжения. Любое изменение напряжения проявляется в виде изменения падения напряжения на резисторе. Сумма падений напряжения должна равняться входному напряжению. Выходное напряжение может быть увеличено или уменьшено путем замены стабилитрона и последовательно включенного резистора.

Ток через нагрузку определяется сопротивлением нагрузки и выходным напряжением. Через последовательно включенный резистор течет сумма тока нагрузки и тока стабилитрона. Этот резистор должен быть тщательно подобран таким образом, чтобы ток через стабилитрон удерживал его в области стабилизации.

Когда ток через нагрузку увеличивается, ток через стабилитрон уменьшается и сумма этих токов поддерживает напряжение постоянным. Это позволяет цепи поддерживать постоянное выходное напряжение при изменениях выходного тока так же, как и при изменениях входного напряжения.

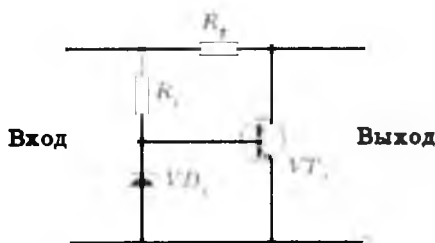


Рис. 12.14

На рис. 12.14 изображена параллельная регулирующая цепь, использующая транзистор. Заметим, что транзистор VT_1 включен параллельно нагрузке. Это защищает стабилизатор в случае короткого за-

мыкания в нагрузке. Существуют более сложные параллельные стабилизаторы, которые используют более одного транзистора.

Для иллюстрации принципа работы последовательного стабилизатора рассмотрим переменный резистор, включенный последовательно с нагрузкой (рис. 12.15). Для поддержания постоянного напряжения на нагрузке сопротивление R_2 можно изменять. При увеличении входного напряжения сопротивление R_2 увеличивают, чтобы на нем падало излишнее напряжение и напряжение на нагрузке оставалось постоянным.

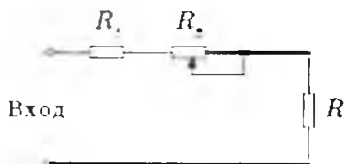


Рис. 12.15

С помощью резистора R_2 можно также компенсировать изменения тока нагрузки. При увеличении тока нагрузки падение напряжения на переменном резисторе увеличивается. Это приводит к уменьшению падения напряжения на нагрузке. Если в момент увеличения тока уменьшить сопротивление, то падение напряжения на переменном резисторе останется постоянным. В результате постоянным окажется и выходное напряжение, несмотря на изменения тока нагрузки.

На практике переменный резистор заменяют транзистором. Транзистор включен таким образом, что через него течет ток нагрузки. Путем изменения тока базы можно управлять величиной тока, текущего через транзистор. В схему включают дополнительные элементы, которые позволяют транзистору автоматически компенсировать изменения входного напряжения и тока нагрузки.

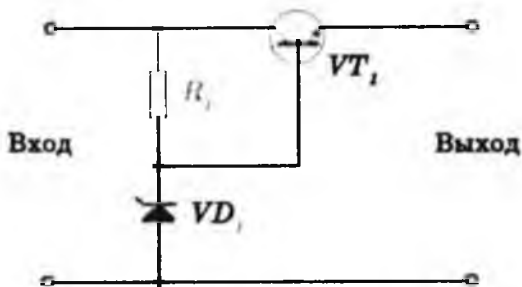


Рис. 12.16

На рис. 12.16 изображен простой последовательный стабилизатор. На его вход подается нестабилизированное постоянное напряжение, а на его выходе получается стабилизированное постоянное напряжение меньшее по величине. Транзистор включен как эмиттерный повторитель, и поэтому здесь отсутствует обращение фазы между базой и эмиттером. Напряжение на эмиттере повторяет напряжение на базе. Нагрузка подключена между эмиттером транзистора и землей. Напряжение на базе транзистора устанавливается с помощью стабилитрона. Следовательно, выходное напряжение равно напряжению стабилизации стабилитрона минус 0,7 В падения напряжения на переходе база-эмиттер.

Когда входное напряжение на транзисторе увеличивается, выходное напряжение также пытается увеличиться. Напряжение на базе транзистора установлено с помощью стабилитрона. Если на эмиттере появляется больший положительный потенциал, чем на базе, проводимость транзистора уменьшается. Когда транзистор уменьшает свою проводимость, это действует так же, как установка между входом и выходом большого резистора. Большая часть добавившегося входного напряжения падает на транзисторе, и только малая его часть увеличит выходное напряжение.

В последние годы вместо стабилизаторов на дискретных компонентах все чаще используют стабилизаторы на интегральных микросхемах.

Современные стабилизаторы на интегральных микросхемах дешевы и просты в применении. Большинство стабилизаторов на интегральных микросхемах имеют только три вывода (вход, выход и земля) и могут быть подсоединены непосредственно к выходу фильтра выпрямителя. Стабилизаторы на интегральных микросхемах обеспечивают широкий диапазон выходных напряжений как положительной, так и отрицательной полярности. Существуют также двухполярные стабилизаторы напряжения. Если стабилизатора с нужным напряжением нет среди стандартных микросхем, можно использовать микросхему стабилизатора с регулируемым напряжением.

При выборе микросхемы стабилизатора необходимо знать напряжение и ток нагрузки, а также электрические характеристики нестабилизированного блока питания.

12.4. Типы усилителей на транзисторах

Усилители – это электронные цепи, которые используются для увеличения амплитуды электронного сигнала. Цепь, рассчитанная на преобразование низкого напряжения в высокое, называется усилителем напряжения. Цепь, рассчитанная на преобразование слабого тока в сильный, называется усилителем тока. В современной радиоэлектронике основными усилительными устройствами являются транзисторы.

Для того чтобы транзистор обеспечивал усиление, он должен быть в состоянии принять входной сигнал и выдать выходной сигнал, значительно больший, чем входной.

Входной сигнал управляет током, текущим через транзистор. Этот ток в свою очередь управляет напряжением на нагрузке. Транзисторная цепь рассчитана таким образом, чтобы брать напряжение от внешнего источника питания и подавать его на резистор нагрузки в виде выходного напряжения.

Существует несколько способов включения транзистора в цепь: *схема с общей базой, схема с общим эмиттером и схема с общим коллектором*. В каждой из этих схем один из выводов транзистора служит общей точкой, а два других являются входом и выходом, при этом на переход эмиттер-база подается напряжение смещения в прямом направлении, а на переход коллектор-база – в обратном. Каждая схема имеет преимущества и недостатки и может быть собрана как с *p-n-p*, так и с *n-p-n* транзистором.

В схеме с общей базой (рис. 12.17) входной сигнал подается в цепь эмиттер-база, а выходной снимается с цепи коллектор-база. База является общим элементом для входа и выхода.

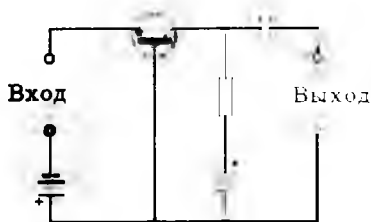


Рис. 12.17

В схеме с общим эмиттером (рис. 12.18) входной сигнал подается в цепь эмиттер-база, а выходной сигнал снимается с цепи коллектор-эмиттер. Эмиттер является общим для входа и выхода. Этот способ включения транзистора используется наиболее широко.

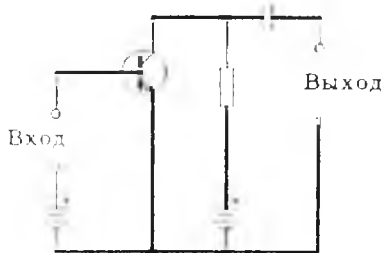


Рис. 12.18

Третий тип соединения (рис. 12.19) – это схема с общим коллектором. В этой схеме входной сигнал подается в цепь база-коллектор, а выходной сигнал снимается с цепи эмиттер-коллектор. Здесь коллектор является общим для входа и выхода. Эта схема используется для согласования импедансов (импедансом называется полное сопротивление цепи переменному току).

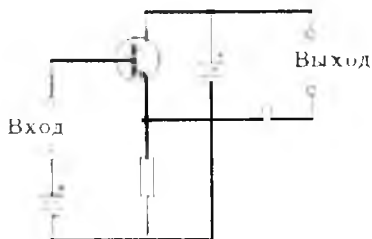


Рис. 12.19

В таблице 12.1 приведены входные и выходные сопротивления, а также величина усиления по напряжению, току и мощности для трех схем включения транзистора.

Таблица 12.1

Тип цепи	Входное сопротивление	Выходное сопротивление	Усиление по напряжению	Усиление по току	Усиление по мощности
Общая база	Десятки Ом	Сотни килоом – единицы МОм	Несколько сотен	Меньше единицы	Несколько сотен
Общий эмиттер	Тысячи Ом	Десятки – сотни КОм	Несколько десятков	Несколько сотен	Несколько тысяч
Общий коллектор	Десятки – сотни КОм	Десятки – сотни Ом	Меньше единицы	Несколько сотен	Несколько десятков

Отметим, что схема с общим эмиттером изменяет фазу входного сигнала на 180° , тогда как схемы с общей базой и с общим коллектором фазу входного сигнала не изменяют.

Как видно из рис. 12.17–12.19, все три схемы усиления требуют двух источников тока. Переход база-эмиттер должен быть смещен в прямом направлении, а переход база-коллектор должен быть смещен в обратном направлении. Однако оба напряжения смещения могут быть обеспечены с помощью одного источника тока.

Поскольку цепи с общим эмиттером используются наиболее часто, мы их опишем более детально. Те же принципы применимы и к цепям с общей базой и общим коллектором.

На рис. 12.20 изображен транзисторный усилитель с общим эмиттером, использующий один источник питания. Источник питания обозначен $+V$. Символ заземления является отрицательным выводом источника питания V . Один источник питания обеспечивает подачу смещения для переходов база-эмиттер и база-коллектор. Два резистора (R_B и R_K) используются для распределения напряжения, обеспечивающего правильную работу. Резистор R_K , сопротивление нагрузки коллектора, соединен пос-

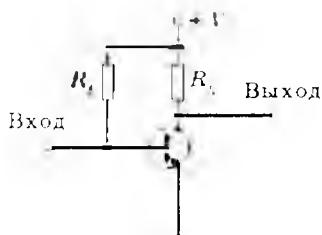


Рис. 12.20

ледовательно с коллектором. Когда через коллектор течет ток, на резисторе R_K появляется падение напряжения. Падение напряжения на резисторе R_K и падение напряжения на переходе коллектор-эмиттер транзистора в сумме должны равняться приложенному напряжению.

Резистор R_B , соединяющий базу с источником питания, управляет величиной тока базы. Ток базы, текущий через резистор R_B , создает на нем падение напряжения, составляющее большую часть напряжения источника питания. Меньшая часть этого напряжения падает на переходе база-эмиттер транзистора, обеспечивая правильное прямое смещение.

Один источник питания может обеспечить необходимые напряжения прямого и обратного смещения. В случае $n-p-n$ транзистора потенциал на базе и коллекторе транзистора должен быть положительным по отношению к эмиттеру. Следовательно, источник питания может быть связан с базой и коллектором через резисторы R_B и R_K . Эту цепь часто называют цепью смещения базы, так как ток базы управляется величиной резистора R_B и напряжением источника питания.

Входной сигнал подключается между базой транзистора и его эмиттером или между выводом входа и землей. Значение входного сигнала либо склады-

вается с прямым смещением на эмиттерном переходе, либо вычитается из него. Это служит причиной изменения коллекторного тока, что в свою очередь приводит к изменению падения напряжения на резисторе R_k . Выходной сигнал появляется между выводом выхода и землей.

Цепь, изображенная на рис. 12.20, не обладает хорошей стабильностью, так как она не может компенсировать изменения тока смещения при отсутствии сигнала. Изменения температуры приводят к изменению внутреннего сопротивления транзистора, что заставляет изменяться ток смещения. Это сдвигает рабочую точку транзистора, уменьшая его усиление. Этот процесс называется *температурной нестабильностью*.

Существует возможность компенсации температурных изменений в схеме транзисторного усилителя. Если часть нежелательного выходного сигнала подать на вход цепи, этот сигнал будет противодействовать изменениям в транзисторе. Этот процесс называется *отрицательной обратной связью* (рис. 12.21).

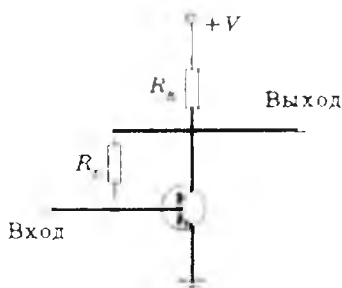


Рис. 12.21

В цепи, использующей отрицательную обратную связь, базовый резистор R_b соединен непосредственно с коллектором транзистора. Если температура увеличивается, то ток коллектора и падение напряжения на резисторе R_k тоже увеличиваются. Напряжение коллектор-эмиттер уменьшается, уменьшая также напряжение, приложенное к R_b . Это уменьшает ток базы, что служит причиной уменьшения тока коллектора. Так работает *коллекторная цепь обратной связи*.

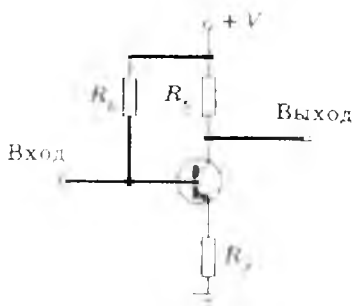


Рис. 12.22

На рис. 12.22 показан другой тип обратной связи. Эта цепь похожа на цепь, изображенную на рис. 12.21, за исключением того, что последовательно с выводом эмиттера включен резистор R_3 . Резисторы R_k и R_3 и переход транзистора эмиттер-база соединены последовательно с источником питания V .

Увеличение температуры служит причиной увеличения коллекторного тока. Ток эмиттера также увеличивается, увеличивая падение напряжения на резисторе R_3 и уменьшая падение напряжения на резисторе R_b . Ток базы уменьшается, что уменьшает как ток коллектора, так и ток эмиттера. Поскольку сигнал обратной связи создается на эмиттере транзистора, эта цепь называется *цепью эмиттерной обратной связи*.

В цепи этого типа имеет место уменьшение общего усиления, поскольку входной сигнал переменного тока появляется как на резисторе R_k , так и на резисторе R_3 и на транзисторе. При подсоединении параллельно резистору R_3 конденсатора C_3 (рис. 12.23), сигнал переменного тока обходит резистор R_3 , так как сопротивление конденсатора переменному току существенно меньше R_3 . Этот конденсатор называют блокировочным конденсатором. Его емкость выбирается таким образом, чтобы выполнялось соотношение $1 / \omega C_3 \ll R_3$.

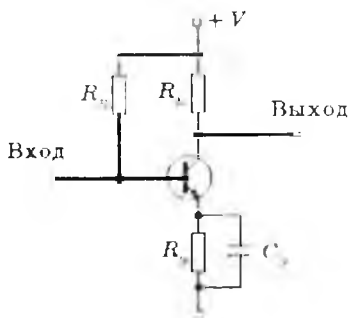


Рис. 12.23

Блокировочный конденсатор устраняет любые быстрые изменения напряжения на резисторе R_3 , благодаря тому, что он обладает низким импедансом для переменного тока, удерживает постоянное напряжение на резисторе R_3 неизменным, не мешая работе цепи обратной связи, обеспечиваемой R_3 .

Наибольшую стабильность обеспечивает *цепь обратной связи с делителем напряжения* (рис. 12.24). Эта цепь используется наиболее широко. Здесь резистор R_6 заменяется двумя резисторами, R_1 и R_2 . Эти последовательно соединенные резисторы под-

ключены параллельно источнику питания V . Они делят напряжение питания на два напряжения, образуя делитель напряжения.

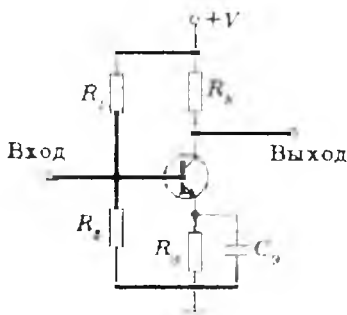


Рис. 12.24

На резисторе R_2 падает меньшее напряжение, чем на резисторе R_1 . Напряжение на базе по отношению к земле равно падению напряжения на резисторе R_2 . Цель делителя напряжения — установить постоянное напряжение на базе транзистора по отношению к земле. Подсоединенный к базе конец резистора R_2 имеет положительный потенциал по отношению к земле.

Так как через резистор R_3 течет ток эмиттера, то на конце резистора R_3 , подсоединенном к эмиттеру, имеется положительный потенциал по отношению к земле. Напряжение на переходе эмиттер-база является разностью двух положительных напряжений — напряжения на резисторе R_2 и напряжения на резисторе R_3 . Для того, чтобы имело место правильное прямое смещение, положительный потенциал базы должен быть немного выше положительного потенциала эмиттера.

При увеличении температуры токи коллектора и эмиттера также увеличиваются. Увеличение тока эмиттера приводит к увеличению падения напря-

жения на резисторе R_3 . Это приводит к тому, что положительный потенциал эмиттера по отношению к земле увеличивается. Тогда прямое смещение перехода эмиттер-база уменьшается, что приводит к уменьшению тока базы. Уменьшение тока базы уменьшает токи коллектора и эмиттера. Противоположное также имеет место и при понижении температуры: ток базы увеличивается, что приводит к увеличению токов эмиттера и коллектора.

Усилители, обсуждавшиеся до сих пор, имели такое смещение, что весь приложенный входной переменный сигнал появлялся на выходе. Выходной сигнал имел такую же форму, что и входной сигнал, за исключением того, что его величина была больше. Усилитель, смещение которого таково, что ток через него течет во время всего периода сигнала, называется усилителем, работающим в классе А (рис. 12.25).

Усилитель, смещение которого таково, что выходной ток через него течет меньше, чем полный период, но больше половины периода, называется усилителем, работающим в классе АВ. В режиме класса АВ усилитель усиливает больше чем половину периода, но меньше, чем полный период входного сигнала переменного тока (рис. 12.26).

Усилитель, смещение которого таково, что выходной ток через него течет только половину периода входного сигнала, — это усилитель, работающий в классе В. В режиме класса В усиливается только половина входного сигнала переменного тока (рис. 12.27).

Усилитель, смещение которого таково, что выходной ток через него течет меньше, чем половину периода входного сигнала переменного тока — это усилитель, работающий в классе С. В режиме класса С усиливается меньше чем половина периода входного сигнала переменного тока (рис. 12.28).

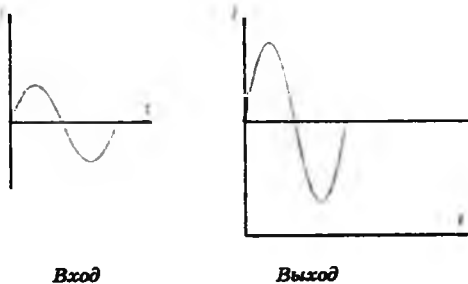


Рис. 12.25

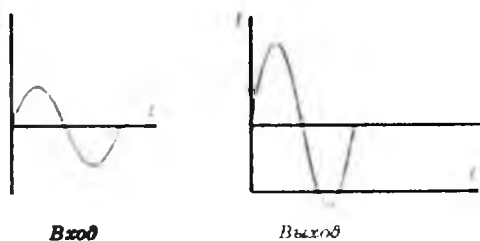


Рис. 12.26

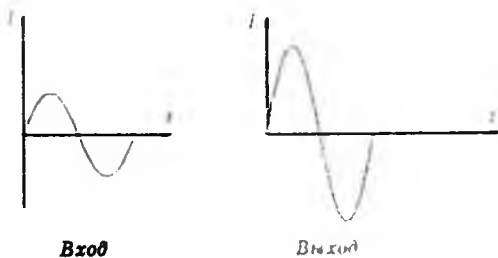


Рис. 12.27

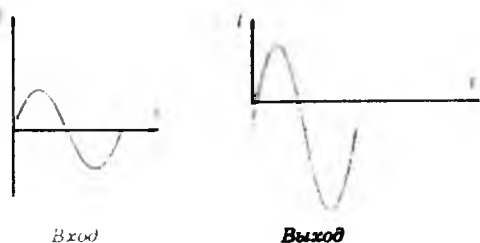


Рис. 12.28

Усилители класса А являются наиболее линейными из всех упомянутых. Они создают наименьшие искажения, но имеют самую низкую выходную мощность и наименее эффективны. Они находят широкое применение в тех случаях, когда требуется точное сохранение входного сигнала, как, например, при усилении сигналов звуковой частоты в радиоприемниках и телевизорах. Для получения большой выходной мощности обычно используют усилители, работающие в режиме класса АВ или класса В.

Усилители классов АВ, В и С создают значительное количество искажений. Это обусловлено тем, что они усиливают только часть входного сигнала. Для усиления полного входного сигнала переменного тока необходимы два транзистора, соединенные в двухтактную схему (рис. 12.29).

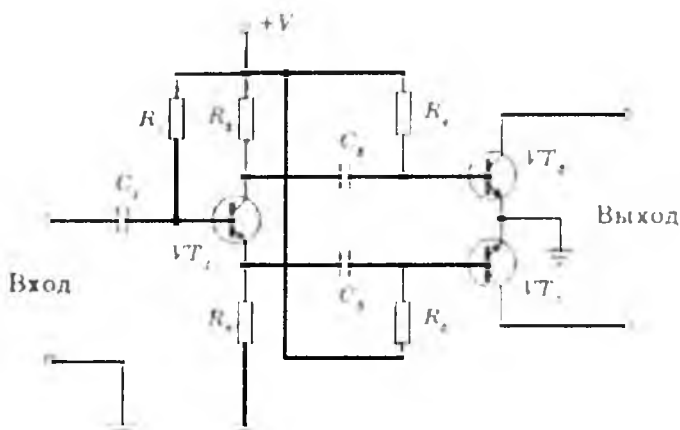


Рис. 12.29

Усилители класса В используются в качестве выходных каскадов в стереосистемах и мощных концертных усилителях, а также в промышленно-

сти. Усилители класса С используются в качестве усилителей высокой мощности в передатчиках, где усиливается только одна частота, например в радио и телевизионных передатчиках.

Для того чтобы получить большее усиление, транзисторные усилители могут быть соединены последовательно. Однако для того чтобы избежать влияния смещения одного усилителя на работу другого, они должны быть соединены определенным образом. При соединении усилителей не должна нарушаться работа никакой цепи. Возможны следующие методы соединения усилительных каскадов (*каскад* — часть сложного усилителя, которую можно рассматривать как отдельный усилитель): посредством резистивно-емкостной, импедансной, трансформаторной и непосредственной (гальванической) связи.

Два каскада, соединенные посредством *резистивно-емкостной связи*, или *RC* связи, показаны на рис. 12.30.

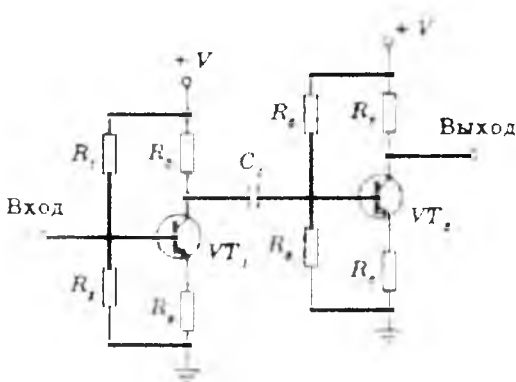


Рис. 12.30

Резистор R_c является коллекторной нагрузкой первого каскада. Конденсатор C_1 является блокирующим для постоянного тока и конденсатором связи

для переменного тока. Резистор R_4 является входной нагрузкой, а также замыкает по постоянному току цепь перехода база-эмиттер второго каскада. Резистивно-емкостная связь используется главным образом в усилителях низкой частоты.

Конденсатор связи C_1 должен иметь низкое реактивное сопротивление для минимизации ослабления сигнала на низких частотах. Обычно используется емкость в пределах от 10 до 100 микрофарад. Конденсатор связи обычно бывает электролитическим.

При уменьшении частоты реактивное сопротивление конденсатора связи увеличивается. Низкочастотная граница усилителя определяется величиной конденсатора связи. Высокочастотная граница определяется типом использованного транзистора.

Импедансная связь подобна RC связи, только вместо резистора в качестве нагрузки коллектора первого каскада усиления используется катушка индуктивности (рис. 12.31).

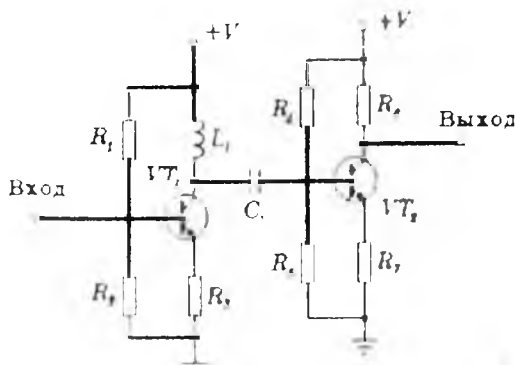


Рис. 12.31

Импедансная связь работает совершенно аналогично RC связи. Ее преимуществом является то, что катушка индуктивности имеет очень низкое сопротивление по постоянному току, а выходной сигнал пе-

ременного тока на катушке индуктивности такой же, как и на нагрузочном резисторе. Однако катушка индуктивности потребляет меньшую мощность, чем резистор, что увеличивает общую эффективность цепи.

Недостатком импедансной связи является то, что индуктивное сопротивление увеличивается при увеличении частоты. Поэтому коэффициент усиления по напряжению изменяется при изменении частоты. Этот тип связи идеален для одночастотного усиления, т. е. когда должна усиливаться очень узкая полоса частот.

В цепи с *трансформаторной связью* два усилительных каскада связаны между собой через трансформатор (рис. 12.32).

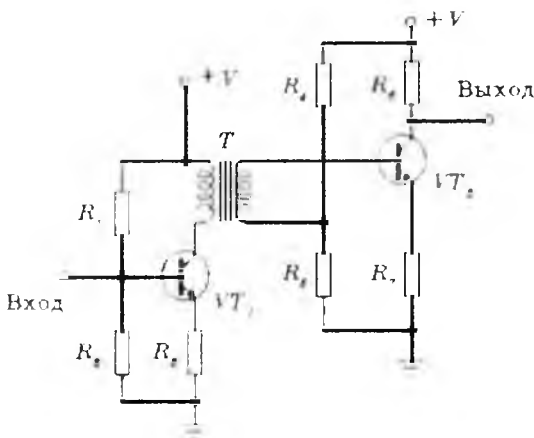


Рис. 12.32

Трансформатор может эффективно согласовать источник с высоким выходным импедансом с нагрузкой с низким импедансом. Недостатком этого метода является то, что трансформаторы велики и дороги. Кроме того, как и усилитель с импедансной связью, усилитель с трансформаторной связью полезен только для узкого диапазона частот.

Когда необходимо усилить очень низкие частоты или сигнал постоянного тока, должен использоваться усилитель с непосредственной (гальванической) связью. На рис. 12.33 изображен двухкаскадный усилитель с гальванической связью.

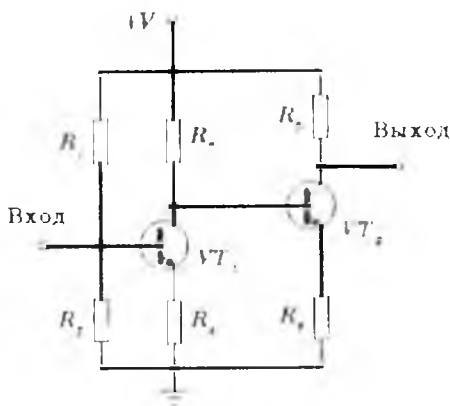


Рис. 12.33

Входной сигнал усиливается первым каскадом. После этого усиленный сигнал поступает на базу транзистора второго каскада. Общее усиление цепи равно произведению коэффициентов усиления по напряжению двух каскадов. Например, если и первый и второй каскады имеют коэффициент усиления по напряжению равный 10, то общий коэффициент усиления цепи равен 100.

Усилители с гальванической связью обеспечивают равномерное усиление по току и напряжению в широком диапазоне частот — от нуля герц (постоянный ток) до многих тысяч герц.

12.5. Генераторы синусоидальных колебаний

Генератор электрических колебаний – это нелинейное устройство, преобразующее энергию источника постоянного тока в энергию колебаний. Генераторы широко используются в электронике: в радиоприемниках и телевизорах, в системах связи, компьютерах, промышленных системах управления и устройствах точного измерения времени.

Генератор – это электрическая цепь, которая генерирует периодический сигнал переменного тока. Частота сигнала может изменяться от нескольких герц до многих миллионов герц. Выходное напряжение генератора может быть синусоидальным, прямоугольным или пилообразным в зависимости от типа генератора.

Когда колебательный контур возбуждается внешним источником постоянного тока, в нем возникают колебания. Эти колебания являются затухающими, поскольку активное сопротивление колебательного контура поглощает энергию тока. Для поддержания колебаний в колебательном контуре поглощенную энергию необходимо восполнить. Это осуществляется с помощью *положительной обратной связи*. Положительная обратная связь – это подача в колебательный контур части выходного сигнала для поддержки колебаний. Сигнал обратной связи должен совпадать по фазе с сигналом в колебательном контуре.

На рис. 12.34 изображена блок-схема генератора. Генератор можно разбить на три части. Частото-задающей цепью генератора обычно является *LC* колебательный контур. Усилитель увеличивает амплитуду выходного сигнала колебательного контура. Цепь обратной связи подает необходимое количе-

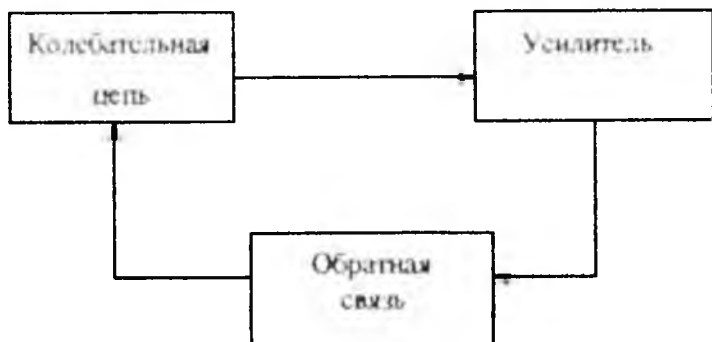


Рис. 12.84

ство энергии в колебательный контур для поддержки колебаний. Таким образом, генератор – это схема с обратной связью, которая использует постоянный ток для получения колебаний переменного тока.

Генераторы синусоидальных колебаний – это генераторы, которые генерируют напряжение синусоидальной формы. Они классифицируются согласно их частотоподающим компонентам. Тремя основными типами генераторов синусоидальных колебаний являются *LC* генераторы, кварцевые генераторы и *RC* генераторы.

LC генераторы используют колебательный контур из конденсатора и катушки индуктивности, соединенных либо параллельно, либо последовательно, параметры которых определяют частоту колебаний. *Кварцевые генераторы* подобны *LC* генераторам, но обеспечивают более высокую стабильность колебаний. *LC* генераторы и кварцевые генераторы используются в диапазоне радиочастот. Они не подходят для применения на низких частотах. На низких частотах используются *RC* генераторы, в которых для задания частоты колебаний используется резистивно-емкостная цепь.

12.5.1. LC генераторы

Основными типами LC генераторов являются генератор Хартли и генератор Колпитца. На рис. 12.35 изображен генератор Хартли. Величина обратной связи в этой схеме зависит от положения отвода катушки L_1 . Выходной сигнал снимается с катушки связи L_2 .

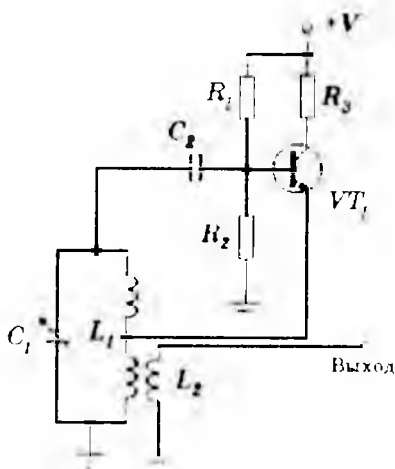


Рис. 12.35

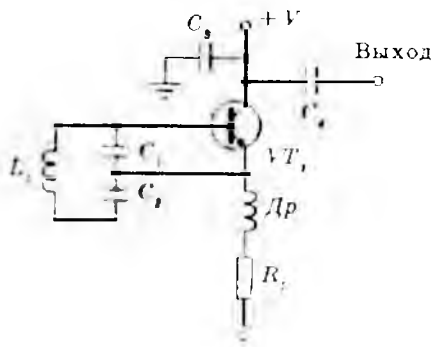


Рис. 12.36

На рис. 12.36 изображен генератор Колпитца. Величина обратной связи в схеме Колпитца определяется отношением емкостей конденсаторов C_1 и C_2 . Генератор Колпитца более стабилен, чем генератор Хартли, и более часто используется.

12.5.2. Кварцевые генераторы

Основное требование, предъявляемое к генератору, — это стабильность частоты и амплитуды его колебаний. Причинами нестабильной работы генераторов являются зависимости емкости и индуктивности от температуры, старение компонентов и изменение требований к нагрузке. Когда требуется высокая стабильность, используются кварцевые генераторы.

Кварц — это материал, который может преобразовывать механическую энергию в электрическую, когда к нему прикладывают давление, и электрическую энергию в механическую, когда к нему прикладывают напряжение. Когда к кристаллу кварца приложено переменное напряжение, кристалл начинает растягиваться и сжиматься, создавая механические колебания, частота которых соответствует частоте переменного напряжения.

Каждый кристалл кварца обладает собственной частотой колебаний, обусловленной его структурой и размерами. Если частота приложенного переменного напряжения совпадает с собственной частотой, колебания кристалла ярко выражены. Если частота приложенного переменного напряжения отличается от собственной частоты кварца, кристалл колеблется слабо. Собственная частота механических колебаний кристалла кварца практически не зависит от температуры, что делает его идеальным для использования в генераторах. В тех случаях, когда необходимо обеспечить очень высокую стабильность частоты ко-

лебаний, применяют термостатирование генератора (кварцевый резонатор помещают в термостат).

Для изготовления кварцевого резонатора на кристаллическую пластинку кварца наносятся металлические электроды, к которым прижимаются пружины для обеспечения электрического контакта. После этого кристалл помещается в металлический корпус. На рис. 12.37 показано схематическое обозначение кварца.



Рис. 12.37

На рис. 12.38 изображена схема кварцевого генератора Хартли с параллельной обратной связью. Кварц включен последовательно в цепь обратной связи. Если частота колебательного контура отклоняется от частоты кварца, импеданс кварца увеличивается, уменьшая величину обратной связи с колебательным контуром. Это позволяет колебательному контуру вернуться на частоту кварца.



Рис. 12.38

На рис. 12.39 изображен генератор Колпитца с кварцем, включенным так же, как и в генераторе Хартли. Кварц управляет обратной связью с колебательным контуром.

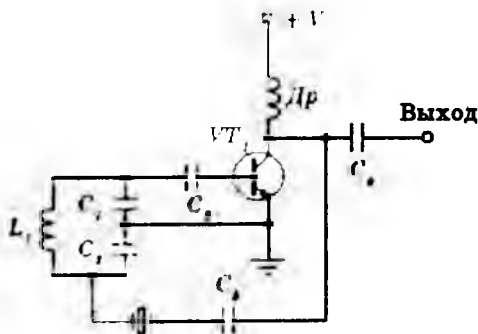


Рис. 12.39

На рис. 12.40 изображен генератор Пирса. Эта схема подобна генератору Колпитца, за исключением того, что катушка индуктивности в колебательном контуре заменена кварцем. Эта схема очень популярна, поскольку в ней не используются катушки индуктивности. Кварц управляет импедансом колебательного контура, что определяет величину обратной связи и стабилизирует генератор.

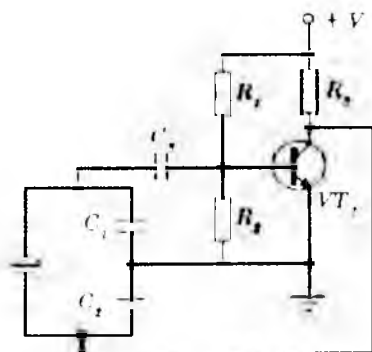


Рис. 12.40

Верхний предел частоты основного резонанса кристалла кварца составляет около 25 МГц. Однако в аппаратуре связи необходимы стабильные генераторы более высоких частот. Для этого требуется обеспечить работу кварцевых резонаторов на их гармонических частотах. Обычно используются нечетные гармоники (третья и пятая).

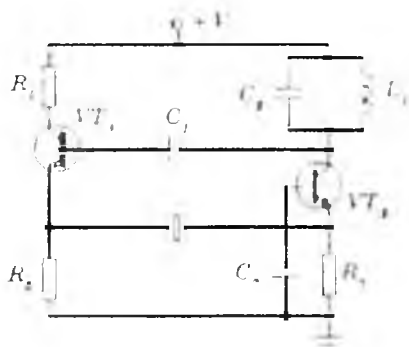


Рис. 12.41

В таких случаях используют генератор Батлера, изображенный на рис. 12.41. Схема собрана на двух транзисторах и использует колебательный контур и кварц для задания и стабилизации частоты колебаний. Колебательный контур должен быть настроен на частоту основного резонанса кварца или на частоту одной из его гармоник. Преимущество генератора Батлера в том, что к кварцу приложено небольшое напряжение, что уменьшает его механические деформации.

12.5.3. RC генераторы

RC генераторы используют для задания частоты резистивно-емкостную цепь. Простейшим RC гене-

ратором синусоидальных колебаний является генератор с фазосдвигающей цепью.

Генератор с фазосдвигающей цепью – это обычный усилитель с фазосдвигающей RC цепью обратной связи (рис. 12.42).

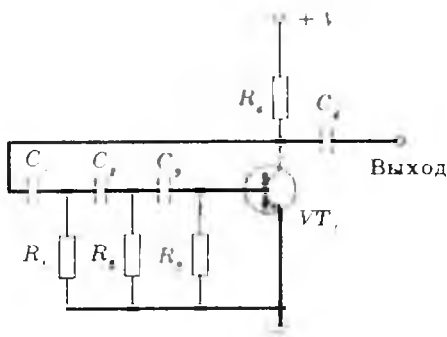


Рис. 12.42

Обратная связь должна сдвигать фазу сигнала на 180° . Так как емкостное сопротивление изменяется при изменении частоты, то эта компонента чувствительна к частоте. Стабильность улучшается при уменьшении величины фазового сдвига на каждой RC цепочке. Однако на комбинации RC цепочек имеют место потери мощности. Для компенсации этих потерь транзистор должен иметь достаточно высокий коэффициент усиления.

12.6. Генераторы колебаний специальной формы

Генераторы несинусоидальных колебаний применяются для создания периодических электрических сигналов произвольной формы (несинусоидальных), спектр которых не может быть выражен одним слага-

емым типа $\cos(\omega t + \varphi)$. Примерами несинусоидальных колебаний могут служить колебания прямоугольной, пилообразной или треугольной формы (или комбинации этих форм). В основном в качестве генераторов несинусоидальных колебаний используют *релаксационные генераторы*. Релаксационный генератор запасает энергию в реактивной компоненте в течение одной фазы цикла колебаний и постепенно отдает ее в течение релаксационной фазы цикла.

Релаксационными генераторами являются блокинг-генераторы и мультивибраторы. На рис. 12.43 изображена схема блокинг-генератора.

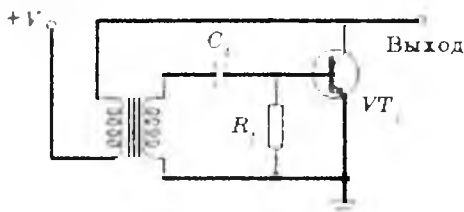


Рис. 12.43

Причиной названия является то, что транзистор легко переводится в режим блокирования (запирания). Условие блокирования определяется разрядом конденсатора C_1 . Конденсатор C_1 заряжается через переход эмиттер-база транзистора VT_1 . Однако когда конденсатор C_1 заряжен, у него есть только один путь разряда — через резистор R_1 . Постоянная времени RC цепочки из резистора R_1 и конденсатора C_1 определяет, как долго транзистор будет заперт (блокирован), а также определяет частоту колебаний ($\nu = 1 / R_1 C_1$). Такой блокинг-генератор выдает импульсы прямоугольной формы.

Если выходное напряжение взять с RC цепочки в эмиттерной цепи транзистора, то оно будет иметь пилообразную форму (рис. 12.44).

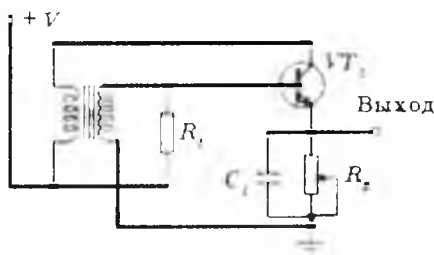


Рис. 12.44

В этом случае частоту колебаний определяет цепочка R_2C_1 . На транзистор VT_1 подано напряжение смещения в прямом направлении через резистор R_1 . Как только транзистор VT_1 начинает проводить, конденсатор C_1 быстро заряжается. Положительный потенциал на верхней обкладке конденсатора C_1 смещает эмиттерный переход в обратном направлении, запирая транзистор VT_1 . Конденсатор C_1 разряжается через резистор R_2 , образуя задний фронт пилообразного импульса. Когда конденсатор C_1 разряжается, транзистор VT_1 опять смещается в прямом направлении и начинает проводить, повторяя процесс.

Конденсатор C_1 и резистор R_2 определяют частоту колебаний. Сделав резистор R_2 переменным, можно изменять частоту колебаний, которая определяется соотношением $\nu = 1 / R_2C_1$.

Мультивибратор – это релаксационный генератор, который может находиться в одном из двух временно стабильных состояний и может быстро переключаться из одного состояния в другое.

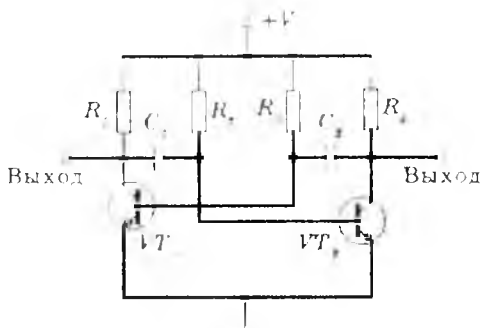


Рис. 12.45

На рис. 12.45 изображена основная схема автоколебательного мультивибратора. Основой генератора являются два каскада, связанных между собой таким образом, что на вход каждого каскада подается сигнал с выхода другого каскада. Когда один каскад открыт, другой каскад заперт до тех пор, пока эти условия не поменяются местами. Цепь самовозбуждается благодаря наличию положительной обратной связи. Частота колебаний определяется параметрами цепи связи ($\nu = 0,7 / R_2 C_1 = 0,7 / R_3 C_2$).

12.7. Элементы цифровых электронных цепей

В основе цифровой электроники лежит двоичная система счисления. Для записи чисел в двоичной системе нужны только две цифры – ноль (0) и единица (1). Двоичная система счисления используется в цифровых цепях благодаря тому, что двоичные цифры легко представить в виде двух напряжений – высокого и низкого. Данные в двоичной системе представляются двоичными цифрами, которые на-

зываются битами. Термин *бит* означает двоичная цифра (разряд) (*binary digit*).

Все цифровое оборудование, от простого до сложного, сконструировано с использованием небольшого количества основных схем. Эти схемы, называемые *логическими элементами*, выполняют некоторые логические функции с двоичными данными.

Существуют два основных типа логических схем: схемы принятия решений и память. *Логические схемы принятия решений* контролируют двоичные состояния входов и выдают выходной сигнал, основанный на состояниях входов и характеристиках логической схемы. *Схемы памяти* используются для хранения двоичных данных.

12.7.1. Логические элементы

Рассмотрим некоторые логические схемы.

Элемент И – это логическая схема, на выходе которой 1 появляется только тогда, когда на все его входы поступает сигнал 1. Если на какой-либо из входов поступает 0, на выходе появляется 0.

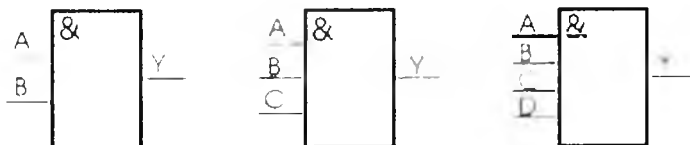


Рис. 12.46

На рис. 12.46 показаны стандартные обозначения, используемые для элементов И. Элемент И может иметь любое количество входов, большее одного. Показанные на рисунке обозначения представляют наиболее часто используемые элементы с двумя, тремя и четырьмя входами.

Состояние и логическую связь между входными и выходными сигналами элемента И отражает так называемая *таблица истинности* (табл. 12.2), которая показывает выходное состояние двухвходового элемента для любых возможных состояний входов: А и В – входы; Y – выход.

Таблица 12.2

А	В	Y
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Элемент И выполняет операцию логического умножения. Логическое умножение известно как функция И.

Элемент ИЛИ – это логическая схема, на выходе которой появляется 1, если на любой из его входов подана 1. На его выходе появляется 0, если на все его входы поданы 0. Этот элемент, как и элемент И, может иметь два или более входов. На рис. 12.47 показаны стандартные обозначения, используемые для элементов ИЛИ с двумя, тремя и четырьмя входами.

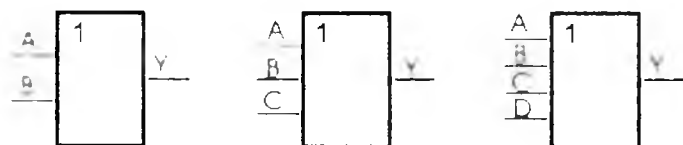


Рис. 12.47

Значения на выходе элемента ИЛИ с двумя входами приведены в таблице истинности (табл. 12.3): А и В – входы; Y – выход.

Таблица 12.3

A	B	Y
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

Элемент ИЛИ выполняет логическую операцию сложения.

Элемент НЕ выполняет функцию, которая называется инверсией, или дополнением, и обычно называется инвертором. Цель инвертора – сделать состояние выхода противоположным состоянию входа. В логических цепях возможны два состояния – 1 и 0. Состояние 1 также называют высоким, чтобы указать, что напряжение в этом состоянии выше, чем в состоянии 0. Состояние 0 также называют низким, чтобы указать, что напряжение в этом состоянии ниже, чем в состоянии 1. Если на вход инвертора подано высокое состояние, или 1, то на выходе появится низкое состояние, или 0. Если же на вход инвертора подать низкое состояние, или 0, то на выходе появится высокое состояние, или 1.

Схематическое обозначение инвертора показано на рис. 12.48.

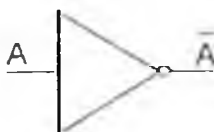


Рис. 12.48

Работу инвертора отражает таблица истинности (табл. 12.4). Вход инвертора обозначен A , а выход \bar{A} (читается «не A »). Черточка над буквой A показывает отрицание A . Поскольку инвертор имеет только один вход, то возможны только два состояния входа.

Таблица 12.4

A	Y
0	1
1	0

Элемент И-НЕ является комбинацией элементов И и НЕ. Элемент И-НЕ является наиболее широко используемой логической функцией. Это обусловлено тем, что эти элементы могут быть использованы для создания некоторых других логических элементов.

Схематическое обозначение элемента И-НЕ показано на рис. 12.49. На рисунке также показана его эквивалентность последовательно включенным элементу И и инвертору. Кружочек на выходе обозначает инвертирование функции И.

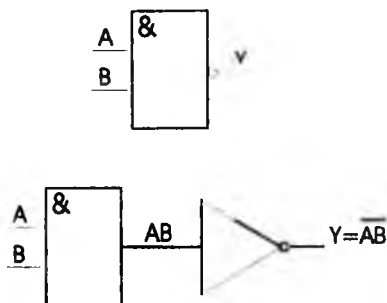


Рис. 12.49

Ниже приведена таблица истинности для двухвходового элемента И-НЕ (табл. 12.5). Заметим, что выход элемента И-НЕ является отрицанием выхода элемента И. Подача 0 на любой вход дает на выходе 1.

Таблица 12.5

A	B	Y
0	0	1
1	0	1
0	1	1
1	1	0

Элемент ИЛИ-НЕ является комбинацией элемента ИЛИ и инвертора. Подобно элементу И-НЕ, элемент ИЛИ-НЕ также может быть использован для создания других логических элементов.

Схематическое обозначение элемента ИЛИ-НЕ показано на рис. 12.50. На рисунке также показана его эквивалентность последовательно включенным элементу ИЛИ и инвертору. Кружочек на выходе показывает инвертирование функции ИЛИ.

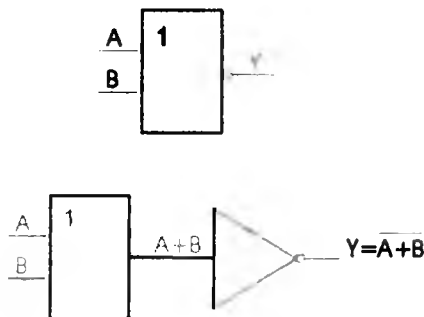


Рис. 12.50

Таблица 12.6

A	B	Y
0	0	1
1	0	0
0	1	0
1	1	0

Таблица 12.6 – таблица истинности для двухвходового элемента ИЛИ-НЕ. Заметим, что его выход является отрицанием выхода элемента ИЛИ. 1 на выходе появляется только тогда, когда на оба входа поданы 0. Если на любой из входов подана 1, то на выходе будет 0. Существуют элементы ИЛИ-НЕ с двумя, тремя, четырьмя и восемью входами.

12.7.2. Триггеры

Триггеры принадлежат к категории цифровых цепей, называемых мультивибраторами. Мультивибратор – это цепь с положительной обратной связью,

имеющая два активных устройства, рассчитанных таким образом, что одно устройство проводит ток, в то время как другое устройство закрыто (см. разд. 12.6). Мультивибраторы могут хранить двоичные числа, импульсы счета, синхронизировать арифметические операции и выполнять другие полезные функции в цифровых системах. Существуют три типа мультивибраторов: бистабильные, моностабильные и астабильные.

Триггер – это бистабильный мультивибратор, на выходе которого может быть либо высокое, либо низкое напряжение, т. е. либо 1, либо 0. На выходе триггера остается высокое или низкое напряжение до тех пор, пока на вход не будет подан пусковой сигнал.

Существует несколько типов триггеров.

RS-триггер образован двумя перекрестно связанными элементами ИЛИ-НЕ или И-НЕ (рис. 12.51).

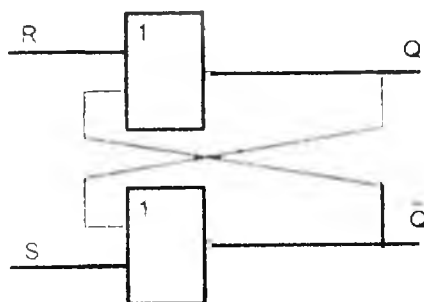


Рис. 12.51

RS-триггер имеет два выхода Q и \bar{Q} и два управляющих входа: R (Reset – сброс) и S (Set – установка). На выходах триггера уровни всегда противоположны (дополняющие уровни): если $Q = 1$, то $\bar{Q} = 0$, и наоборот.

Для того чтобы понять работу цепи, предположим что выход Q , вход R и вход S имеют низкий

уровень. Низкий уровень выхода Q подается на один из входов элемента 2. На входе S также низкий уровень. На выходе элемента 2 высокий уровень. Этот высокий уровень подается на вход элемента 1, удерживая его выход на низком уровне. Когда на выходе Q появляется низкий уровень, говорят, что триггер в исходном состоянии (RESET). Он остается в этом состоянии неопределенно долго, до тех пор, пока на вход S элемента 2 не будет подан высокий уровень. Когда на вход S элемента 2 будет подан высокий уровень, на выходе элемента 2 появится низкий уровень, а этот выход связан со входом элемента 1. Поскольку на входе R элемента 1 низкий уровень, на его выходе Q низкий уровень изменится на высокий. Этот высокий уровень подается на вход элемента 2, обеспечивая на выходе Q низкий уровень. Когда на выходе Q высокий уровень, говорят, что триггер в единичном (SET) состоянии. Он остается в этом состоянии до тех пор, пока на вход R не будет подан высокий уровень, переводящий триггер в исходное состояние.

«Недопустимое», или «неразрешенное», условие имеет место, когда одновременно на оба входа, R и S , подается высокий уровень. В этом случае выходы Q и \bar{Q} пытаются перейти в низкое состояние, но Q и \bar{Q} не могут быть одновременно в одинаковом состоянии без нарушения работы триггера. При одновременном отключении высокого уровня со входов R и S оба выхода пытаются перейти в состояние с высоким уровнем. Поскольку всегда логические элементы немного отличаются друг от друга, то один из них перейдет в состояние с высоким уровнем. Это заставит другой элемент перейти в состояние с низким уровнем. В этом случае имеет место непредсказуемый режим работы и, следовательно, состояние выходов триггера не может быть определено.

Таблица 12.7 – таблица истинности для работы RS-триггера. На рис. 12.52 изображено упрощенное схематическое обозначение RS-триггера.

Таблица 12.7

S	R	Q	\bar{Q}
0	0	Без изменений	Без изменений
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	?	?

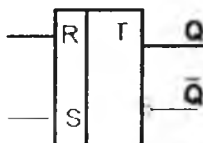


Рис. 12.52

Другим типом триггера является *триггер с синхронизирующим входом*. Он отличается от RS-триггера тем, что для его работы необходим дополнительный вход. Третий вход называется тактовым (или синхронизирующим). На рис. 12.53 изображена логическая схема триггера с синхронизирующим входом и его схематическое обозначение. Сигнал высокого уровня на любом из входов входного блока триггера активизирует триггер, заставляя его изменить состояние. Входной блок, называемый «управляющим элементом», направляет тактовые импульсы на входы элементов триггера.

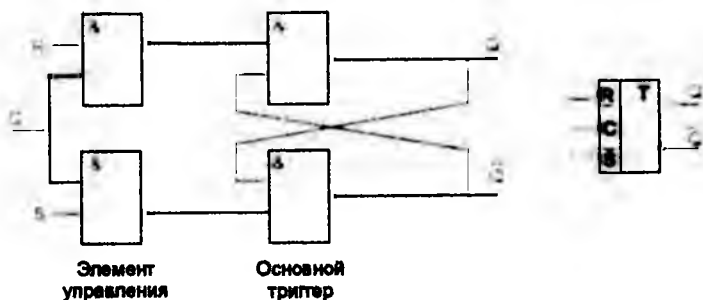


Рис. 12.58

Триггер с синхронизирующим входом управляется логическими состояниями входов R и S при наличии тактового импульса. Изменение состояния триггера происходит только по переднему фронту тактового импульса. Передний фронт тактового импульса — это переход в положительном направлении (от низкого к высокому), что означает возрастание амплитуды импульса от нулевого до положительного напряжения. Этот процесс называется *запуск по положительному фронту* (фронту импульса, запускающему цепь).

Пока уровень на тактовом входе низкий, уровни входов R и S могут изменяться, не влияя на состояние триггера. Входы R и S становятся чувствительными только в течение тактового импульса. Триггер работает синхронно с тактовым сигналом. Синхронная работа важна в компьютерах и калькуляторах, когда каждый шаг должен быть выполнен в определенном порядке.

В цифровых микросхемах очень часто применяют триггеры с единственным входом данных D (data), так называемые *D-триггеры*. Они полезны тогда, когда должен быть сохранен только один бит данных (1 или 0). На рис. 12.54 изображены логическая схема и условное обозначение D-триггера.

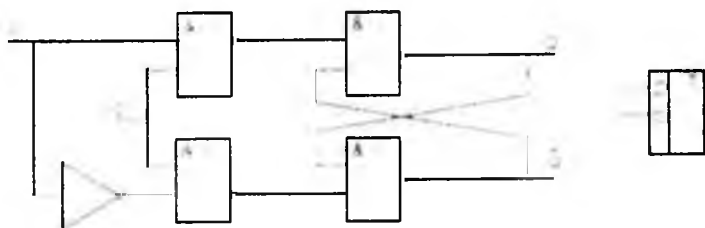


Рис. 12.54

Он имеет один вход для данных и вход для тактовых импульсов. D-триггер также называют триггером с задержкой. Вход D задерживает один тактовый импульс перед изменением уровня выхода (Q). Иногда D-триггер имеет вход PS (предустановка) и вход CLR (очистка). Когда на вход предустановки подан низкий уровень (0), он устанавливает выход Q в состояние 1. Когда на вход очистки подан 0, он устанавливает на выходе Q также 0. D-триггеры, соединенные вместе, образуют сдвиговые регистры и регистры памяти, которые широко используются в цифровых системах.

Наиболее широко используемый триггер – это JK-триггер. Он обладает всеми особенностями триггеров других типов. Логическая схема и обозначение JK-триггера показаны на рис. 12.55.

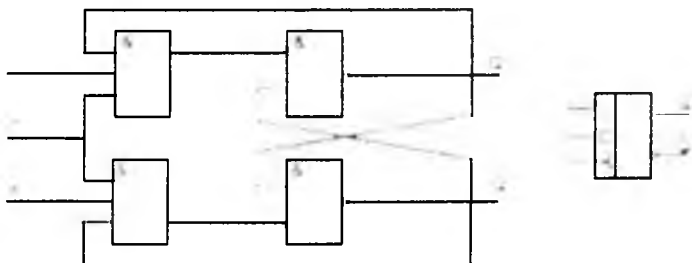


Рис. 12.55

Ж и К – это входы. Важной особенностью ЖК-триггера является то, что когда на оба входа Ж и К подан высокий уровень, повторяющиеся тактовые импульсы заставляют выход переключаться или изменять состояние. ЖК-триггер может иметь два асинхронных входа, PS (предустановка) и CLR (очистка), которые блокируют синхронные входы (входы данных Ж и К и вход тактовых импульсов). ЖК-триггеры широко используются во многих цифровых цепях, особенно в схемах счетчиков. Счетчики можно найти почти в каждой цифровой системе.

Триггеры являются основными строительными блоками для построения последовательных логических цепей. Они могут быть соединены вместе и образовывать счетчики, сдвиговые регистры и устройства памяти.

Вопросы для повторения

1. Нарисуйте схему однополупериодного выпрямителя и объясните его работу.
2. Каковы недостатки однополупериодного выпрямителя?
3. Нарисуйте схему двухполупериодного выпрямителя и объясните его работу.
4. Каковы недостатки двухполупериодного выпрямителя?
5. Нарисуйте мостовую схему выпрямителя и объясните ее работу.
6. Нарисуйте схему трехфазного выпрямителя с нейтральной точкой и объясните ее работу.
7. Нарисуйте мостовую схему трехфазного выпрямителя и объясните ее работу.
8. Каково назначение сглаживающего фильтра?
9. Объясните принцип работы сглаживающего фильтра.
10. Нарисуйте схемы наиболее распространенных сглаживающих фильтров.
11. Для чего служит стабилизатор напряжения?
12. Каковы два основных типа стабилизаторов напряжения?

13. Нарисуйте схему простого стабилизатора напряжения на стабилитроне и объясните, как она работает.
14. Нарисуйте схему последовательного стабилизатора и объясните ее работу.
15. Нарисуйте схему параллельного стабилизатора и объясните ее работу.
16. Нарисуйте схемы трех основных конфигураций транзисторных усилительных цепей.
17. Нарисуйте схему транзисторного усилителя с общим эмиттером, использующего один источник питания.
18. Как компенсируются изменения температуры в транзисторном усилителе?
19. Перечислите классы усилителей с указанием особенностей их работы.
20. Каковы основные способы соединения транзисторных усилителей?
21. Какой метод соединения используется при усилении низкочастотных сигналов и сигналов постоянного тока?
22. Что такое генератор?
23. Нарисуйте блок-схему генератора.
24. Перечислите три типа генераторов синусоидальных колебаний.
25. В каких случаях используют кварцевые генераторы?
26. Нарисуйте схему блокинг-генератора. Какой формы колебания он может генерировать?
27. Перечислите несколько логических элементов цифровых цепей и укажите, какие функции они выполняют.
28. Что такое таблица истинности?
29. Что такое триггер?
30. Какие типы триггеров вы знаете?
31. Что такое триггер с синхронизирующим входом?

Глава 13. Производство и распределение электроэнергии

13.1. Электрические станции

Электрической станцией называется предприятие, предназначенное для выработки электрической энергии. Электрическая энергия на электростанциях вырабатывается генераторами, приводимыми во вращение какими-либо первичными двигателями. В зависимости от вида энергии, преобразуемой в электрическую, электростанции можно разделить на следующие основные категории: тепловые, гидравлические, атомные, ветровые, солнечные и геотермальные. Последние используют тепловую энергию горячих подземных источников.

Тепловые электростанции в качестве первичных двигателей могут иметь паровые турбины, двигатели внутреннего сгорания и газовые турбины. Электростанции, на которых в качестве первичных двигателей используют паровые турбины, в свою очередь, подразделяются на конденсационные и теплофикационные.

На конденсационных паротурбинных станциях отработанный пар охлаждается и конденсируется в специальных конденсаторах с проточной водой, а

затем поступает в общий водоем. КПД таких станций достигает 30–35%.

На *теплофикационных станциях*, или *теплоэлектроцентралях* (ТЭЦ), не весь нагретый пар проходит через турбину. Некоторая доля пара используется для нужд теплоснабжения (отопление, обеспечение потребителей горячей водой). Таким образом, от ТЭЦ потребители получают не только электроэнергию, но и тепло. Коэффициент полезного действия ТЭЦ с учетом теплоты и электрической энергии, отдаваемой потребителям, достигает 60–70%. ТЭЦ дает возможность ликвидировать экономически неэффективные мелкие отопительные и промышленные котельные установки.

Станции с паротурбинными двигателями обычно строят вблизи природных залежей дешевого твердого топлива (торф, бурый уголь, сланцы и т. п.). Теплоэлектроцентрали строят вблизи городов, так как передача тепла на расстояние связана с большими потерями. Двигатели внутреннего сгорания (карбюраторные и дизели) применяют для привода генераторов лишь на передвижных электростанциях.

Коэффициент полезного действия тепловых станций сравнительно низок, так как при их работе для получения электроэнергии необходимо трехкратное превращение энергии: энергия топлива при сжигании превращается во внутреннюю энергию водяного пара в котле (в теплоту), затем энергия пара в паровой турбине превращается в механическую энергию и только потом механическая энергия турбины превращается в электрическую энергию в генераторе; каждое превращение энергии сопровождается неизбежными потерями.

Гидравлические электростанции, или ГЭС, в качестве первичных двигателей используют гидрав-

личные турбины, приводимые во вращение за счет энергии падающей воды. Гидравлические электростанции в зависимости от особенностей сооружений подразделяются на *приплотинные* и *деривационные*.

На приплотинных и русловых гидростанциях плотина и гидрогенераторы находятся в одном месте. Плотиной перегораживается все русло реки, и уровень воды поднимается. На мелких реках с малым уклоном русла плотина создает водохранилище, из которого по деривационному каналу вода подается в напорный бассейн, а из него по крутопадающим трубам поступает в гидротурбины. Мощность гидроэлектростанции зависит от высоты напора воды и от количества воды, проходящей через турбины. Если гидроэлектростанция имеет большое водохранилище, то имеется возможность многолетнего или сезонного регулирования производства электроэнергии. При малых водохранилищах возможно лишь суточное регулирование выработки электроэнергии. Так, в часы малой нагрузки вода накапливается в водохранилище, а затем расходуется в течение нескольких часов максимальной нагрузки станции.

Коэффициент полезного действия гидроэлектростанций достигает 80–90%. Производство электроэнергии на них гораздо проще и дешевле, чем на тепловых станциях, так как отпадает необходимость в приобретении и подвозе топлива, а также значительно сокращаются расходы на содержание обслуживающего персонала. Правда, первоначальные затраты на сооружение гидроэлектростанций значительно выше, чем затраты на сооружение тепловых станций такой же мощности.

Атомные электростанции используют энергию, выделяющуюся при распаде атомных ядер, для получения электрической энергии. Как известно, при

делении ядер урана ^{235}U выделяется большое количество энергии в виде теплоты, которая и преобразуется затем в электрическую. Таким образом, атомная электростанция — это тепловая станция, но от обычной тепловой станции она отличается видом «топлива» и значительной сложностью управления работой.

На атомной электростанции цепная реакция происходит в атомном котле (реакторе). Атомным горючим служат стержни из урана ^{235}U , покрытые защитным слоем алюминия. Стержни вставляют в алюминиевые трубки, а затем в специальные гнезда в графитных блоках. Графит является замедлителем быстрых нейтронов. Скорость цепной реакции регулируется введением в те же блоки стержней из материала, хорошо поглощающего нейтроны. В результате цепной реакции в реакторе выделяется теплота, забираемая жидким теплоносителем (водой или жидким натрием), нагнетаемым в промежуток между алюминиевой трубкой и урановым стержнем. Применение жидкого металла значительно выгоднее, так как его легче нагреть до высокой температуры, чем воду, а от температуры нагревателя зависит к.п.д. установки. Теплоноситель становится радиоактивным, его нельзя направлять в турбину, поэтому теплоноситель сначала отдает свое тепло в теплообменнике для получения перегретого пара, а последний используется в паровом котле для получения водяного пара. Водяной пар уже не радиоактивен, он направляется в паровую турбину, в которой теплота превращается в механическую, а затем в генераторе в электрическую энергию. Коэффициент полезного действия такой станции составляет 25–30%.

В процессе цепной реакции количество урана в стержнях уменьшается, но накапливаются плутоний

и продукты деления ядер урана. Через определенное время эти стержни удаляют из реактора и перерабатывают на химическом заводе, где разделяют оставшийся уран, плутоний и продукты деления. Плутоний можно снова использовать как ядерное горючее, так как при облучении его медленными нейтронами выделяются большое количество энергии и нейтроны, а продукты распада урана используются в промышленности и в медицине.

Ветроэлектростанции в качестве первичных двигателей используют так называемое ветровое колесо с лопастями, приводимое во вращение энергией ветра. Это вращение через шестерни передается генератору. К.п.д. таких станций очень низок из-за невозможности сколько-нибудь полно использовать энергию ветра.

Солнечные электростанции преобразуют энергию излучения Солнца в электрическую энергию. В качестве преобразователей лучистой энергии в электрическую используются полупроводниковые солнечные элементы (см. разд. 11.7). К.п.д. солнечных элементов очень низок — порядка нескольких процентов. Но это не очень важно, поскольку солнечную энергию мы получаем даром. Промышленного значения солнечные электростанции не имеют, но размещение на крыше частного дома достаточного количества солнечных батарей может обеспечить заметную часть необходимой семье электроэнергии.

Геотермальные электростанции преобразуют энергию горячих подземных вод, имеющих в местах интенсивной вулканической деятельности, в электрическую энергию. Такие электростанции уже несколько десятилетий эксплуатируются на Камчатке.

13.2. Энергетические системы.

Распределение электроэнергии между потребителями

В течение суток, а также в течение года потребление электроэнергии не одинаково. Возможности выработки электроэнергии некоторыми типами электростанций (например, ГЭС) также изменяются в течение этих же периодов времени. Однако эти изменения не совпадают по времени, и не всякая электростанция может быстро изменить режим своей работы. Например, если гидроэлектростанция может быть пущена в работу в течение 5–15 минут, то тепловой электростанции потребуется для этого 1–2 часа. Еще сложнее с теплофикационной станцией (ТЭЦ), так как изменение отдаваемой электрической мощности повлечет за собой соответствующее изменение и теплоты, что недопустимо. Поэтому всегда стремятся объединить несколько электростанций, работающих в разных условиях и использующих разные виды природной энергии, в одну общую систему – *энергетическую систему*, внутри которой легко осуществляется перераспределение нагрузки.

Так, сначала загружают ТЭЦ, затем – ГЭС, причем ГЭС загружают так, чтобы полнее использовалась энергия суточного водного потока. Остаток нагрузки предназначается для тепловых станций.

Благодаря объединению многих электростанций в единую энергосистему удастся значительно снизить себестоимость электроэнергии, повысить ее качество (постоянство напряжения и частоты) и надежность в бесперебойном снабжении потребителя. При этом генераторы отдельных станций оказываются в наиболее благоприятных условиях.

Например, значительные колебания нагрузки в отдельных районах не перегружают генераторов

станций, находящихся в этих районах и объединенных в энергосистему, так как необходимая энергия потребляется из мощной энергосистемы. Особенно большой эффект получается при объединении разнотипных электростанций. В этом случае полезная выработка электроэнергии может быть повышена на 30–80%.

В мощных энергосистемах снижается максимум нагрузки из-за неодновременности максимумов на отдельных станциях; значительно снижается резервная мощность; создается возможность легкого пуска мощных электродвигателей; значительно сокращаются расходы на содержание обслуживающего персонала благодаря автоматизации по управлению работой станций. Таким образом, объединение электростанций в энергосистему дает исключительно большие технические и экономические выгоды.

Одно из преимуществ электрической энергии перед другими видами энергии заключается в том, что передачу ее можно осуществлять с малыми потерями на большие расстояния. Однако потери неизбежны, так как провода обладают сопротивлением и ток, проходя по проводам линии, нагревает их.

Чтобы передача электрической энергии была экономически выгодной, необходимо потери на нагревание проводов сделать возможно малыми. Это достигается тем, что передача электроэнергии на большие расстояния ведется при высоком напряжении. Дело в том, что при повышении напряжения ту же самую энергию можно передавать при меньшей силе тока, что приводит к уменьшению нагревания проводов, а следовательно, к уменьшению потерь энергии (см. разд. 2.4). На практике при передаче электроэнергии пользуются напряжениями 110, 220, 330, 500, 750, 1150 и 1500 кВ. Чем длиннее линия элек-

тропередачи, тем более высокое напряжение в ней используется.

Генераторы переменного тока на электростанциях дают напряжение порядка нескольких киловольт. Перестройка генераторов на более высокое напряжение затруднительна – в этом случае потребовалось бы особо высокое качество изоляции всех частей генератора, находящихся под током. Поэтому при передаче электроэнергии на большие расстояния приходится повышать напряжение при помощи трансформаторов, устанавливаемых на повышающих подстанциях.

Это высокое напряжение передается по линиям электропередачи (ЛЭП) к месту потребления. Но потребителю не нужно высокое напряжение. Его понижают на понижающих подстанциях.

Понижающие подстанции подразделяются на районные, главные понижающие и местные подстанции. Районные принимают электроэнергию непосредственно от высоковольтных ЛЭП, понижают напряжение и передают ее на главные понижающие подстанции, где напряжение понижается до 6, 10 или 35 кВ. С главных подстанций электроэнергия передается на местные, где напряжение понижается до 380/220 В и распределяется на промышленные предприятия и жилые дома.

При современном уровне развития электротехники невозможно ограничиться применением только одного рода тока – постоянного или переменного, поскольку и тот и другой имеют свойственные только ему достоинства и недостатки как в производстве, так и в передаче и использовании. В частности, главные достоинства переменного тока трехфазной системы состоят в том, что трехфазные генераторы просты по конструкции и дешевы в производстве. Их можно строить на мощности до 300 МВА с к.п.д. до

99%. Напряжение переменного тока легко преобразуется с помощью трансформаторов. Исключительно прост, дешев и надежен в работе асинхронный трехфазный двигатель.

К недостаткам переменного тока относится низкая пропускная способность линий электропередачи и особенно кабельных линий из-за наличия емкости между проводами и проводами и землей. В связи с необходимостью объединения мощных станций и систем, расположенных на значительных расстояниях друг от друга, выяснилось, что синхронная работа станций и систем становится при этом неустойчивой и даже невозможной. Дело в том, что синхронная работа соединенных между собой систем возможна лишь при условии, что мощность в линии электропередачи не превышает определенного предела, называемого пределом устойчивости. При повышении напряжения предел устойчивости повышается, но он сильно понижается при увеличении длины линии. Однако при повышении напряжения быстро растет стоимость оборудования конечных подстанций и стоимость самой линии, в которой для ослабления коронного разряда (т.е. стекания электричества с проводов высокого напряжения через воздух) необходимо значительное увеличение диаметра проводов. Устойчивая передача электроэнергии переменным током практически возможна на расстояниях до 450–500 км при напряжении 400–500 кВ.

Постоянный ток неэкономичен в производстве и использовании. Генераторы постоянного тока из-за наличия скользящих контактов в цепи нагрузки сложны по конструкции и в эксплуатации. Они могут быть построены на мощности лишь до 20 МВт при к.п.д. до 94%. Кроме того, не существует простых способов преобразования постоянного напря-

жения и нет дешевых и простых по конструкции и эксплуатации двигателей постоянного тока. Однако постоянный ток имеет такие качества, которые делают его в некоторых случаях незаменимым. Сюда относится отсутствие реактивной мощности в цепях постоянного тока, отсутствие необходимости синхронизации параллельно работающих генераторов и, следовательно, отсутствие предела устойчивости и дальности передачи, возможность значительного повышения напряжения (свыше миллиона вольт).

Поэтому наиболее перспективным способом передачи электроэнергии на дальние расстояния является использование постоянного тока.

Сущность современной дальнейшей передачи электрической энергии постоянным током состоит в следующем. Электростанция вырабатывает переменный ток по трехфазной системе, напряжение которого повышается до нужного значения, затем с помощью мощных выпрямителей выпрямляется и постоянный ток передается по линии высокого напряжения. На приемном конце линии электропередачи постоянный ток с помощью инверторных установок снова преобразуется в переменный трехфазный и затем уже электроэнергия распределяется между потребителями.

Применение постоянного тока для передачи электроэнергии на большие расстояния открывает новые возможности для электроэнергетики, главными из которых являются следующие:

- электропередача может иметь любую длину и мощность, так как отпадает проблема электрической устойчивости;
- пропускная способность воздушных и кабельных линий значительно повышается, а их протяженность ничем не ограничивается;

- упрощается возможность объединения электростанций в энергетическую систему, так как отпадает необходимость их синхронизации;
- легко регулируется значение передаваемой мощности и ее направление с помощью управляемых выпрямителей;
- развитие системы передачи электроэнергии постоянным током не требует перестройки оборудования действующих электростанций и систем.

Передача электроэнергии постоянным током имеет и недостатки:

- сложность конструкций конечных подстанций, увеличение потерь энергии, повышение их стоимости и сложность эксплуатации;
- невозможность простого ответвления от линии электропередачи в промежуточных пунктах.

Передача электроэнергии постоянным током экономически оправдывает себя только при передаче больших мощностей на большие расстояния. Так, например, мощность 750 МВт выгоднее передавать постоянным током, начиная с расстояний в 650 км, а мощность в 1500 МВт – начиная с 500 км.

Вопросы для повторения

1. Назовите основные типы электростанций.
2. На какие типы делятся паротурбинные электростанции?
3. На какие типы подразделяются гидроэлектростанции?
4. Опишите работу атомной электростанции.
5. Что такое энергетическая система и для чего она служит?
6. Какие напряжения используются в линиях электропередачи?
7. Какие напряжения дают понижающие подстанции?

8. При каких условиях возможна устойчивая передача электроэнергии переменным током?

9. Как осуществляется передача электроэнергии постоянным током?

10. Каковы преимущества и недостатки передачи электроэнергии постоянным током?

Глава 14. Элементы техники безопасности

14.1. Действие электрического тока на организм

Прохождение электрического тока через тело человека, являющееся хорошим проводником, может представлять серьезную опасность и даже быть причиной смерти. Воздействие электрического тока на человека может быть различным: от легкого судорожного сокращения мышц до прекращения работы сердца и зависит от многих причин. На характер воздействия тока на человека влияют сопротивление тела и значение приложенного к нему напряжения. Различают три предельных значения тока (при его протекании по пути рука-рука): ощутимый, неотпускающий и фибрилляционный.

Ощутимый ток (0,6–1,5 мА) вызывает слабый зуд и легкое покалывание. Ощутимый ток не опасен для жизни, однако при длительном воздействии отрицательно сказывается на здоровье человека.

Ток в 3–5 мА вызывает уже раздражение всей кисти руки. При токе 8–10 мА боль резко усиливается и охватывает всю руку, непроизвольно сокращаются мышцы рук и предплечья.

Неотпускающий ток (10–15 мА) вызывает сильную боль, при этом судороги настолько усиливаются, что пострадавший не может разжать руку, в которой находится токоведущая часть.

Ток в 25–50 мА действует не только на мышцы рук, но и на мышцы туловища, при этом происходит сужение кровеносных сосудов и повышение артериального давления, а пострадавший теряет сознание. Длительное воздействие такого тока может привести к прекращению дыхания и даже к смерти.

Фибрилляционный ток (100 мА и более), протекая по тому же пути, проникает глубоко в грудь, раздражая мышцы сердца. Такой ток очень опасен: через 1–2 с после начала его действия начинаются частые сокращения волокон сердечной мышцы (фибрилл), прекращается движение крови в сосудах и наступает смерть.

Ток более 5 А (как переменный, так и постоянный) приводит к немедленной остановке сердца, минуя состояние фибриллизации.

До сих пор речь шла о переменном токе промышленной частоты (50 Гц). При повышении частоты (начиная с 1 000–2 000 Гц) опасность электрического тока заметно снижается и при частотах 450–500 кГц полностью исчезает (кроме ожогов). Это объясняется поверхностным эффектом: ток высокой частоты проходит по нечувствительной поверхности кожи.

Постоянный ток примерно в 4–5 раз безопаснее переменного при напряжениях до 250–300 В. При более высоких напряжениях постоянный ток оказывается опасней переменного.

У разных людей сопротивление тела различно. Так, при сухой, чистой и неповрежденной коже сопротивление тела человека колеблется от 3000 до

100 000 Ом и более, причем основную часть сопротивления создает кожа человека, тогда как ткани тела обладают довольно малым сопротивлением (300–500 Ом). На сопротивление кожи сильно влияет ее состояние: наличие царапин и ссадин. Увлажнение кожи водой или потом, а также загрязнение сильно снижают ее сопротивление. На сопротивление кожи сильно влияют площадь контактов и особенно место на теле человека. Очень малым сопротивлением обладает кожа лица, шеи, рук выше локтя, тыльной стороны кистей рук, подмышечные впадины человека. Сопротивление кожи ладоней и подошв из-за ее загрубелости и мозолистости значительно выше. При повышении напряжения сопротивление кожи уменьшается: так, например, при напряжениях 50–200 В наступает электрический пробой нечувствительного поверхностного слоя кожи, рогового слоя.

14.2. Основные причины поражения электрическим током

Поражение электрическим током происходит при замыкании электрической цепи через тело человека. Двухфазным прикосновением называют тот случай, когда человек касается двух проводов, а однофазным – когда человек касается одного провода, имея при этом контакт с землей.

При двухфазном прикосновении на тело человека подается линейное напряжение U_n и через него протекает большой ток. Если считать, что среднее сопротивление тела человека $R = 3000$ Ом, то идущий через него ток равен:

$$I = \frac{U_n}{R} = \frac{380\text{В}}{3000\text{Ом}} = 0,127\text{А} = 127\text{мА}.$$

Этот ток смертельно опасен.

При однофазном прикосновении в сети с заземленным нулевым проводом образуется последовательная цепь из сопротивлений тела человека, обуви, пола и заземления нулевого провода источника тока. К этой цепи приложено не линейное, а фазное напряжение. В этом случае все зависит от сопротивления обуви и пола, поскольку сопротивление заземления нулевого провода обычно очень мало. Если человек в сырой или в подбитой гвоздями обуви стоит на сырой земле или на проводящем полу, то сопротивления обуви и пола пренебрежимо малы по сравнению с сопротивлением человека и протекающий через тело ток будет равен:

$$I = \frac{U_{\phi}}{R} = \frac{220 \text{ В}}{3000 \text{ Ом}} = 73 \text{ мА} .$$

Такой ток также смертельно опасен.

Однако если человек обут в резиновую обувь и стоит на сухом деревянном полу, то, считая сопротивление обуви 50 000 Ом и сопротивление пола 100 000 Ом, протекающий через него ток будет равен:

$$I = \frac{220 \text{ В}}{153000 \text{ Ом}} = 0.0014 \text{ А} = 1.4 \text{ мА} .$$

Такой ток не опасен для человека. Мы видим насколько важно в целях безопасности использование резиновой обуви и особенно непроводящего пола.

При однофазном прикосновении к сети без нулевого провода (или с незаземленным нулевым проводом) цепь замыкается через тело человека и несовершенную изоляцию проводов сети. Если изоляция исправна, то она имеет очень большое сопротивление, и такое прикосновение не должно быть опасным. В сетях высокого (1 000 В и более) напряже-

ния емкость между фазами и землей может создать большой емкостной ток, опасный для человека.

14.3. Заземление электроустановок

Заземление электроустановок бывает двух типов: защитное заземление и заземление на нейтраль (зануление).

Защитное заземление – это специальное соединение с землей корпусов электрических машин и приборов, которые могут оказаться под напряжением. Защитное заземление делается для снижения напряжения между землей и корпусом машины, попавшим под напряжение, до безопасного значения. В случае пробоя изоляции между фазой и корпусом машины прикоснувшийся к машине человек оказывается зашунтированным ничтожно малым сопротивлением защитного заземления, при этом ток, проходящий через человека, не представляет опасности. Защитное заземление состоит из заземлителя и заземляющих проводников. В качестве заземлителя обычно используют стальные трубы диаметром 30–50 мм или уголок размером от 40х40 до 60х60 мм длиной 2,5–3 м. Заземлитель забивают в землю, а верхние концы сваривают стальной полосой или прутком сечением не менее 50 мм². В качестве заземлителей часто используют проложенные в земле водопроводные трубы, металлические конструкции и др. В качестве заземляющих проводников (т.е. проводников, соединяющих заземлитель с заземляемыми приборами) обычно используют стальные или медные шины, которые либо приваривают к корпусам машин, либо соединяют с ними болтами. Защитному заземлению подлежат металлические корпуса электрических машин, трансформаторов, каркасы щитов, пультов и шкафов, сталь-

ные трубы электропроводок, а также ручной электроинструмент.

Зануление – это соединение корпусов электрических машин и приборов, которые могут оказаться под напряжением не с землей, а с заземленным нулевым проводом. Это приводит к тому, что замыкание любой из фаз на корпус прибора или машины превращается в короткое замыкание этой фазы с нулевым проводом. В результате большой ток короткого замыкания вызывает срабатывание защиты и поврежденная установка отключается. Схема зануления состоит из проводника заземления нейтрали источника тока, нулевого защитного проводника и повторного заземления нулевого защитного проводника. Различают нулевой рабочий проводник и нулевой защитный проводник. Нулевой рабочий проводник является нулевым проводом для питания электроустановок и имеет равноценную с другими проводами сети изоляцию и достаточное сечение для длительного рабочего тока. Нулевой защитный проводник служит для создания кратковременного тока короткого замыкания для срабатывания защиты и быстрого отключения поврежденной установки от питающей сети. Его сопротивление должно быть не больше половины сопротивления фазного провода. В качестве нулевого защитного провода могут быть использованы стальные трубы электропроводок, а также нулевые рабочие провода, которые не должны иметь предохранителей и выключателей.

Для защиты персонала от поражения электрическим током применяют различные защитные средства: диэлектрические (резиновые) перчатки, слесарно-монтажный инструмент с изолированными ручками, диэлектрические (резиновые) боты и коврики и др. В качестве предупредительных средств

применяют плакаты: «Осторожно! Высокое напряжение», «Не включать! Работают люди».

Для предупреждения несчастных случаев от поражения электрическим током необходим постоянный контроль за состоянием изоляции электрических установок. Состояние изоляции проверяют в новых установках, в установках после ремонта и модернизации, а также после длительного перерыва в работе. Профилактический контроль изоляции проводят не реже 1 раза в 3 года. Сопротивление изоляции проводов измеряют мегаомметрами на номинальное напряжение 1 000 В на участках между смежными предохранителями (при снятых плавких вставках и при выключенных токоприемниках) между каждым проводом и землей и между каждыми двумя проводами. Сопротивление изоляции силовых и осветительных электропроводок должно быть не меньше 0,5 МОм.

14.4. Оказание первой помощи пораженному электрическим током

Современная медицина располагает многочисленными средствами оказания помощи пораженным электрическим током, но всем, кто работает с электрическими установками, необходимо знать, как быстро оказать пострадавшему первую доврачебную помощь.

Прежде всего надо освободить пострадавшего от действия тока, так как даже находящийся в сознании пострадавший из-за непроизвольного сокращения мышц, возможно, не сможет, например, разжать руку с зажатым в ней проводом. Необходимо отключить установку рубильником, снятием или вывертыванием предохранителей. Если такой возмож-

ности нет, необходимо перерубить отдельно каждый провод или накоротко замкнуть и заземлить провода электроустановки.

Если нельзя быстро отключить электроустановку, то пострадавшего необходимо отделить от токоведущих частей. При этом оказывающий помощь должен соблюдать необходимые меры предосторожности, чтобы самому не оказаться под напряжением. Если одежда пострадавшего сухая, то отделить его от токоведущих частей можно за одежду, действуя при этом одной рукой и держа вторую руку за спиной или в кармане (иначе руки могут одновременно прикоснуться к двум точкам с разными потенциалами). Если одежда пострадавшего влажная, то на него следует накинуть резиновый коврик или сухую ткань, а затем освободить от действия тока. В таких случаях оказывающий помощь должен использовать резиновую обувь, диэлектрические перчатки, изолирующие подставки или сухие доски.

Меры первой доврачебной помощи пострадавшему зависят от его состояния. Если пострадавший находится в сознании, но был в обмороке или продолжительное время находился под действием тока, то до прибытия врача его следует удобно уложить, расстегнуть одежду и обеспечить полный покой. Если невозможно быстро вызвать врача, пострадавшего необходимо срочно доставить в лечебное учреждение.

Если пострадавший находится в бессознательном состоянии, но его дыхание и пульс устойчивы, то в ожидании врача его следует удобно уложить, расстегнуть одежду и пояс и обеспечить приток свежего воздуха. Следует попытаться привести его в сознание, давая нюхать нашатырный спирт и обрызгивая лицо холодной водой (не изо рта).

Если пострадавший не проявляет признаков жизни (отсутствуют дыхание и сердцебиение, зрачки расширены и не реагируют на свет), то в ожидании врача надо немедленно приступить к искусственному дыханию и массажу сердца. В этом случае пострадавшего надо положить на горизонтальную поверхность, расстегнуть одежду, запрокинуть голову, при необходимости с помощью платка или марли освободить полость рта от слизи и крови, а затем через марлю или носовой платок провести искусственное дыхание способом «изо рта в рот». Оказывающий помощь при этом с силой вдыхает воздух в рот пострадавшего, а затем дает ему возможность пассивного выхода. При каждом вдувании грудная клетка пострадавшего должна расширяться. Одновременно с искусственным дыханием целесообразно проводить массаж сердца. Для этого оказывающий помощь накладывает обе руки на область, расположенную на два пальца выше мягкого конца грудины, и быстрым толчком руками нажимает на грудину так, чтобы ее конец сместился вниз на 3–4 см, повторяя толчки через 1 секунду и чередуя искусственное дыхание с надавливанием на грудную клетку (после двух глубоких вдуваний в рот – 15 надавливаний на грудную клетку с частотой 1 раз в секунду). Искусственное дыхание и массаж сердца пострадавшему надо проводить до возвращения ему сознания, признаками которого являются восстановление регулярного пульса, сужение зрачков с реакцией на свет и попытка пошевелить конечностями. Этот процесс может быть длительным, но не надо терять надежду вернуть пострадавшему жизнь.

ЛИТЕРАТУРА

Электротехника/ Под ред. А.Я. Шихина.— М.:
Высш. шк., 1989.

Гусев Н.И. Электротехника и основы промышленной электроники.— Минск: Вышэйш. шк.,
1975.

Китаев В.Е. Электротехника с основами промышленной электроники.— М.: Высш. шк.,
1973.

Кузнецов М.И. Основы электротехники.— М.:
Высш. шк., 1970.

Оглавление

Введение	3
Глава 1. Основы электростатики	6
1.1 Строение вещества	6
1.2. Электрические заряды. Закон Кулона. Электрическое поле. Принцип суперпозиции	10
1.3. Проводники и диэлектрики в электрическом поле	16
1.4. Работа по перемещению заряда в электрическом поле. Потенциал	18
1.5. Электроемкость. Конденсаторы. Соединение конденсаторов	22
Глава 2. Постоянный электрический ток	27
2.1. Закон Ома для участка цепи. Сопротивление	27
2.2. Соединение сопротивлений	34
2.2.1. Последовательное соединение	34
2.2.2. Параллельное соединение	35
2.3. Работа и мощность электрического тока. Закон Джоуля–Ленца	37
2.4. Расчет проводов на потерю напряжения	39

2.5. Источники электрического тока. Электродвижущая сила. Закон Ома для замкнутой цепи	41
2.6. Разветвленные цепи. Правила Кирхгофа	43
2.7. Методы расчета электрических цепей	46
Глава 3. Электромагнетизм	57
3.1. Взаимодействие токов. Магнитное поле	57
3.2. Магнитные свойства веществ	62
3.3. Электромагнитная индукция. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца	67
3.4. Самоиндукция. Индуктивность	69
Глава 4. Однофазный переменный ток	72
4.1. Получение переменного тока	72
4.2 Действующие значения тока и напряжения ...	76
4.3. Метод векторных диаграмм	77
4.4. Цепь переменного тока с активным сопротивлением	78
4.5. Цепь переменного тока с индуктивностью	80
4.6. Цепь переменного тока с индуктивностью и активным сопротивлением	82
4.7. Цепь переменного тока с емкостью	84
4.8. Цепь переменного тока с емкостью и активным сопротивлением	86
4.9. Последовательная цепь переменного тока. Резонанс напряжений	89
4.10. Параллельная цепь переменного тока. Резонанс токов	93
4.11. Мощность переменного тока	96
Глава 5. Трехфазный переменный ток	99
5.1. Принцип построения трехфазной системы	99
5.2. Соединение звездой	101
5.3. Соединение треугольником	107
5.4. Мощность трехфазной системы и методы ее измерения	110
Глава 6. Электрические измерения и приборы	117
6.1. Классификация измерительных приборов и погрешности измерений	117
6.2. Устройство электроизмерительных	

приборов	122
6.3. Приборы магнитоэлектрической системы	125
6.4. Приборы электромагнитной системы	128
6.5. Приборы электродинамической и ферродинамической систем	130
6.6. Однофазный индукционный счетчик электрической энергии	135
6.7. Омметр	139
6.8. Термоэлектрические и детекторные приборы	140
6.9. Цифровые измерительные приборы	142
6.10. Измерение неэлектрических величин электрическими методами. Датчики	144
Глава 7. Трансформаторы	147
7.1. Устройство и принцип работы трансформатора	147
7.2. Режимы работы трансформатора	151
7.3. Коэффициент полезного действия трансформатора	153
7.4. Трехфазные трансформаторы	155
7.6. Измерительные трансформаторы	160
Глава 8. Асинхронные электрические машины	166
8.1. Классификация машин переменного тока	166
8.2. Устройство и принцип работы асинхронного двигателя	167
8.3. Создание вращающегося магнитного поля ...	170
8.4. Скорость вращения магнитного поля. Скольжение	172
8.5. Асинхронный двигатель с фазным ротором .	176
8.6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя	179
8.7. Пуск и реверсирование асинхронных двигателей	182
8.8. Однофазный асинхронный двигатель	188
Глава 9. Синхронные электрические машины переменного тока	196
9.1. Устройство и принцип работы синхронного генератора	196
9.2. Реакция якоря	201

9.3. Характеристики синхронного генератора	203
9.4. Работа синхронной машины в режиме двигателя	207
9.5. Пуск и остановка синхронного двигателя	209
9.6. Характеристики синхронного двигателя	212
Глава 10. Электрические машины	
постоянного тока	215
10.1. Общие сведения	215
10.2. Устройство и принцип работы генератора постоянного тока	215
10.3. ЭДС и вращающий момент генератора постоянного тока	219
10.4. Способы возбуждения генераторов постоянного тока	222
10.5. Двигатели постоянного тока	226
10.6. Способы возбуждения двигателей постоянного тока	229
Глава 11. Электронные приборы	236
11.1. Общие сведения о полупроводниках	236
11.2. Полупроводниковые диоды	245
11.3. Стабилитроны	249
11.4. Тиристоры	252
11.5. Биполярные транзисторы	261
11.6. Полевые транзисторы	265
11.7. Оптоэлектронные устройства	278
11.8. Интегральные микросхемы	285
Глава 12. Основы электроники	295
12.1. Основные схемы выпрямления переменного тока	295
12.2. Сглаживающие фильтры	306
12.3. Стабилизаторы напряжения	311
12.4. Типы усилителей на транзисторах	316
12.5. Генераторы синусоидальных колебаний	332
12.6. Генераторы колебаний специальной формы	339
12.7. Элементы цифровых электронных цепей ...	342
Глава 13. Производство и распределение электроэнергии	356
13.1. Электрические станции	356

13.2. Энергетические системы. Распределение электроэнергии между потребителями.....	361
Глава 14. Элементы техники безопасности	368
14.1. Действие электрического тока на организм	368
14.2. Основные причины поражения электрическим током	370
14.3. Заземление электроустановок.....	372
14.4. Оказание первой помощи пораженному электрическим током	374