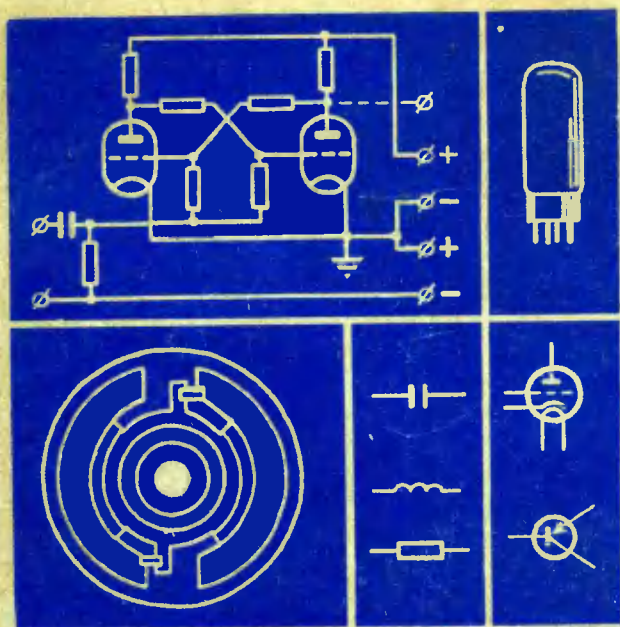




В.С. ПОПОВ, С.А. НИКОЛАЕВ

ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА С ОСНОВАМИ ЭЛЕКТРОНИКИ



В. С. ПОПОВ
С. А. НИКОЛАЕВ

Общая электротехника с основами электроники

Допущено Министерством высшего и
среднего специального образования СССР
в качестве учебника для техникумов



«ЭНЕРГИЯ» МОСКВА 1972

6П2.1

П 58

УДК 621.3

Попов В. С., Николаев С. А.

**П 58 Общая электротехника с основами электроники,
М., «Энергия», 1972.**

504 с. с ил.

В книге рассмотрены электрические цепи, электрические машины и трансформаторы, электротехнические измерения и приборы, электропривод и аппаратура управления, передача и распределение электрической энергии, электронные лампы, газоразрядные приборы, полупроводниковые приборы, фотоэлектрические приборы, усилители и генераторы.

Книга предназначена для учащихся техникумов неэлектротехнических специальностей.

Предисловие

Настоящая книга является учебником по «Общей электротехнике с основами электроники» для техникумов неэлектротехнических специальностей.

Содержание книги полностью соответствует программе по указанной выше дисциплине, утвержденной в 1970 г. Министерством высшего и среднего специального образования СССР.

Обилие материала при весьма ограниченном объеме книги естественно вызвало необходимость держаться сжатой формы изложения.

Главы книги 4, 9, 10, 11 написаны С. А. Николаевым, остальные главы написаны В. С. Поповым.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам канд. техн. наук, доценту Б. Я. Жуховицкому и заслуженному учителю школы РСФСР В. И. Константинову, сделавшим ряд ценных замечаний по рукописи, а также Н. А. Чекалину за большую работу по редактированию книги.

Авторы просят читателей направлять критические замечания по книге в издательство «Энергия» по адресу: Москва, М-114, Шлюзовая набережная, 10.

Авторы

Введение

Программа Коммунистической партии Советского Союза придает первостепенное значение электрификации как основе развития производительных сил нашей страны.

В настоящее время СССР по производству электрической энергии и установленной мощности электростанций занимает второе место в мире и первое в Европе.

Директивы XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства за 1971—1975 гг. предусматривают объем производства электроэнергии в последний год пятилетки 1 030—1 070 млрд. кВт·ч, что означает прирост производства электроэнергии за девятую пятилетку на 290—330 млрд. кВт·ч.

За годы девятой пятилетки будут введены в действие новые мощности электростанций в размере 65—67 млн. кВт, из которых около 8 млн. кВт приходятся на атомные электростанции. Программа строительства атомных электростанций предусматривает в течение 10—12 лет ввести в действие атомные электростанции общей мощностью 30 млн. кВт.

Другой характерной особенностью развития энергетики в девятой пятилетке является строительство крупных тепловых электростанций мощностью до 4 млн. кВт с энергоблоками мощностью 500, 800 и 1 200 кВт, обеспечивающими значительную экономию топлива и резкое повышение производительности труда энергетического персонала.

В текущей пятилетке будет продолжаться создание единой энергосистемы СССР, что позволит передавать электроэнергию из Сибири и Казахстана в европейскую часть страны.

Сформулированное В. И. Лениным в 1920 г. положение «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрифи-

кация всей страны» неуклонно осуществляется под руководством КПСС.

Электротехника наряду с производством и передачей электрической энергии рассматривает вопросы применения электрической энергии для практических целей.

Широкое применение электрической энергии во всех областях народного хозяйства и быта, или, как говорят, их электрификация сопровождается внедрением в производство передовой техники и комплексной механизацией и автоматизацией производственных процессов. Применение электричества изменяет многие технологические процессы, например электросварка, электролиз, закалка токами высокой частоты и т. д. Изобилие дешевой электроэнергии позволяет по-новому решать вопросы технологии производства и внедрять в жизнь достижения передовой науки, обеспечивающие рост производительности труда.

Электроника рассматривает принцип действия, устройство и применение электронных, ионных и полупроводниковых приборов, т. е. приборов, основанных на явлениях прохождения электрически заряженных частиц в вакууме, газах и полупроводниках, а также применение этих приборов в науке, различных областях промышленности и техники. Например, нашли широкое применение в энергетике мощные ионные и полупроводниковые вентили для преобразования переменного тока в постоянный, необходимый для электрической тяги, электрохимического и других производств.

Автоматизация производственных и технологических процессов немыслима без широчайшего применения электронных, ионных и полупроводниковых приборов для контроля, регулирования и управления указанными процессами.

Бурное развитие электронной вычислительной техники позволяет не только поднять на новый уровень работу автоматических и телемеханических устройств, но и решать экономические задачи важного народнохозяйственного значения.

Общеизвестно использование электронных, ионных и полупроводниковых приборов в устройствах беспроводной связи, телевидении, радиолокации и других областях.

Современная техника позволяет в настоящее время использовать в сложных электрических устройствах огромное количество миниатюрных приборов (диодов, транзисторов, резисторов, индуктивностей, конденсаторов и др.), выполняемых как пленочные микросхемы. Для производства этих микросхем используется электроннолучевая и лазерная техника. С помощью электронной технологии осуществляется получение таких материалов, как, например, вольфрам, молибден, тантал, ниобий в сверхчистом состоянии, необходимом для современной техники.

Естественно, что даже для ознакомления с современной техникой надо прочно овладеть основами прикладных наук, и в частности, важнейшими из них — электротехникой и электроникой.

Часть первая

Общая электротехника

Глава первая

Электрическое поле

1-1. Основные понятия

Во всяком теле содержится большое количество элементарных частиц вещества, обладающих э л е к т р и - ч е с к и м и з а р я д а м и ¹, например: протоны — положительными зарядами, электроны — отрицательными. Одни из элементарных заряженных частиц входят в состав атомов и молекул вещества, другие находятся в свободном состоянии. В заряженном теле преобладают положительные или отрицательные заряды, в электрически нейтральном теле число тех и других зарядов одинаково.

Движущиеся электрические заряды неразрывно связаны с окружающим их э л е к т р о м а г н и т н ы м п о л е м, которое представляет собой один из видов материи. Электромагнитное поле состоит из двух взаимно связанных сторон — составляющих: м а г н и т н о г о п о л я и э л е к т р и - ч е с к о г о п о л я, выявляемых по силовому действию на заряженные элементарные частицы или тела.

Разноименно заряженные тела притягиваются друг к другу, одноименно заряженные — отталкиваются. Каждый заряд неразрывно связан с окружающим его электрическим полем, так что взаимодействие заряженных тел происходит при посредстве электрического поля.

Так как электрическое поле оказывает силовое действие на внесенное в него электрически заряженное тело или

¹ Под электрическим зарядом понимается свойство частиц вещества или тел, характеризующее их взаимосвязь с собственным электромагнитным полем и их взаимодействие с внешним электромагнитным полем. Электрический заряд содержит определенное количество э л е к т р и ч е с т в а.

частицы, оно способно совершить работу. Следовательно, электрическое поле обладает энергией, которую называют электрической энергией.

Электрически заряженные частицы вещества и их электрическое поле представляют собой две неразрывно связанные формы материи.

Каждая точка электрического поля характеризуется напряженностью поля $\mathcal{E}$.

Напряженность электрического поля определяется отношением силы F , с которой поле действует на точечный пробный заряд q , помещенный в данную точку поля, к величине этого заряда, следовательно, можно написать:

$$\mathcal{E} = F/q. \quad (1-1)$$

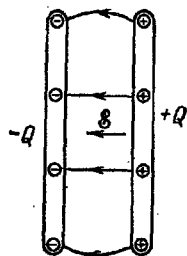


Рис. 1-1. Электрическое поле между двумя параллельными пластинами, заряженными разноименными зарядами.

Точечным пробным зарядом называется заряженное тело, линейные размеры которого весьма малы и заряд которого вследствие малости практически не искажает рассматриваемое поле.

При q , равном единице (одному кулону), $\mathcal{E}$ численно равно F , следовательно, напряженность электрического поля численно равна силе поля, действующей на единичный заряд, т. е. электрический заряд, равный единице (одному кулону).

Напряженность поля характеризуется не только величиной, но и направлением, которое совпадает с направлением силы поля, действующей на положительный заряд, находящийся в данной точке поля. Следовательно, напряженность поля — векторная величина.

На рис. 1-1 показан вектор напряженности $\mathcal{E}$ электрического поля между двумя параллельными пластинами с зарядами $+Q$ и $-Q$.

Электрическое поле графически изображается линиями напряженности электрического поля. Линия напряженности проводится так, чтобы в каждой точке ее вектор напряженности поля был направлен вдоль касательной к ней в этой точке. Линия напряженности электрического поля начинается на положительном заряде и оканчивается на отрицательном электрическом заряде, таким образом, она является не замкнутой.

Если через каждую единичную площадку (например, 1 см^2), перпендикулярную к направлению линии, провести

число линий, равное или пропорциональное напряженности поля в этой части, то плотность линий напряженности можно использовать для оценки величины напряженности поля.

Поле называется однородным, если во всех точках его векторы напряженности равны друг другу. Примером может служить электрическое поле между параллельными пластинами (рис. 1-1) в области, достаточно удаленной от краев пластин.

1-2. Электрическое напряжение. Потенциал

Допустим, что пробный положительный заряд q переместился в однородном электрическом поле под действием сил этого поля из точки M в точку N на расстояние l (рис. 1-2) в направлении поля.

Совершенная при этом силами поля работа за счет потенциальной энергии поля равна:

$$A = Fl,$$

или, приняв во внимание (1-1),

$$A = Fl = \mathcal{E}ql. \quad (1-2)$$

Величина, определяемая отношением работы по перемещению заряда q между двумя точками поля к величине заряда, называется электрическим напряжением¹ между указанными точками M и N .

Следовательно, напряжение

$$U = A/q.$$

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

Так как работа $A = \mathcal{E}ql$, то напряжение

$$U = A/q = \mathcal{E}ql/q = \mathcal{E}l. \quad (1-3)$$

В Международной системе единиц СИ приняты единицы: длины — метр (м); массы — килограмм (кг); времени — секунда (с); силы — ньютон (Н); работы — джоуль (Дж);

¹ Обычно вместо термина «электрическое напряжение» применяют термин «напряжение».

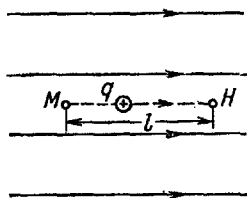


Рис. 1-2. Перемещение электрического заряда $+q$ в однородном поле.

электрического заряда — кулон (Кл); электрического напряжения — вольт (В).

Из выражения (1-3) следует

$$1В = 1 \text{ Дж/1 Кл.}$$

Напряженность электрического поля согласно (1-3) определяется выражением

$$\mathcal{E} = U/l, \quad (1-4)$$

откуда напряженность поля измеряется в вольтах на метр

$$|\mathcal{E}| = В/м.$$

Напряжение между данной точкой M электрического поля и другой произвольно выбранной точкой поля, потенциал которой условно принят равным нулю, называется потенциалом φ данной точки поля. Часто потенциал любой точки земли считают равным нулю.

Потенциал численно равен работе, которая может быть совершена силами электрического поля при перемещении положительного единичного заряда из данной точки поля в точку, потенциал которой принят равным нулю.

При перемещении единичного положительного заряда из точки M , имеющей потенциал φ_M , в точку N с потенциалом φ_N работа, производимая силами поля, т. е. напряжение между указанными точками равно разности потенциалов

$$U_{MN} = \varphi_M - \varphi_N, \quad (1-5)$$

т. е. напряжение между двумя точками электрического поля равно разности потенциалов этих точек. Потенциал измеряется в вольтах, т. е. тех же единицах, что и напряжение.

1-3. Электропроводность

Атомы химических элементов, входящих в состав любого вещества, состоят из положительно заряженного ядра и движущихся вокруг него отрицательно заряженных электронов. Атомы обычно электрически нейтральны, так как заряд ядра равен сумме зарядов окружающих его электронов.

Если от нейтрального атома (молекулы) отделяется электрон, то атом превращается в *положительный ион*. Отделившийся от атома электрон присоединяется к другому нейтральному атому, образуя *отрицательный ион*, или остается свободным. Такие свободные электроны называют

электронами проводимости, а процесс образования ионов — ионизацией. Количество свободных электронов или ионов в единице объема вещества называется концентрацией носителей электрического заряда (n).

В веществе, помещенном в электрическое поле, под действием сил поля возникает направленное движение электронов проводимости или ионов, называемое электрическим током. Свойство вещества создавать электрический ток под действием электрического поля называется электропроводностью вещества. Степень электропроводности оценивается удельной электрической проводимостью материала (см. § 2-3). Электрическая проводимость вещества (тела) зависит от концентрации носителей заряда. При высокой концентрации проводимость вещества больше, чем при малой. Все вещества в зависимости от электрической проводимости делятся на проводники, диэлектрики (электроизоляционные материалы) и полупроводники.

Проводники обладают высокой проводимостью, к ним относятся металлы и их сплавы, уголь, электролиты (водные растворы солей, кислоты щелочей) и расплавы.

Диэлектрики, наоборот, обладают ничтожной проводимостью. К ним относятся газы, минеральные масла, лаки и большое число твердых неметаллических тел.

Полупроводники обладают промежуточной проводимостью между проводниками и диэлектриками. К ним относятся такие металлы, как кремний, германий, селен, окислы металлов и др.

Каждый электрон в атоме может обладать только определенными значениями энергии, т. е. находиться только в разрешенных энергетических состояниях или уровнях, так как изменение энергии электрона может происходить только определенными порциями — квантами. Переход электрона на более высокий энергетический уровень, т. е. на более удаленную орбиту, требует затраты энергии на преодоление притяжения электрона к ядру. Таким образом, более удаленные от ядра электроны обладают большими энергиями. Переход электрона на более низкий уровень сопровождается излучением энергии атомом.

В твердых веществах, образованных совокупностью атомов, вследствие взаимного влияния соседних атомов энергетические уровни несколько изменяются, образуя энергетические зоны. Эти зоны отделяются областями,

в которых электроны не могут находиться, называемыми запрещенными зонами.

Энергетические зоны, соответствующие разрешенным уровням, делятся на заполненную и свободную. Для возникновения электропроводности необходимо части электронов заполненной зоны перейти в свободную зону. Возможность такого перехода определяется шириной запрещенной зоны, пропорциональной энергии, которую необходимо затратить для указанного перехода электронов.

Различие электрической проводимости проводников, полупроводников и диэлектриков вызывается особенностями их строения. Согласно зонной теории твердого тела у металлических проводников высокая электрическая прово-

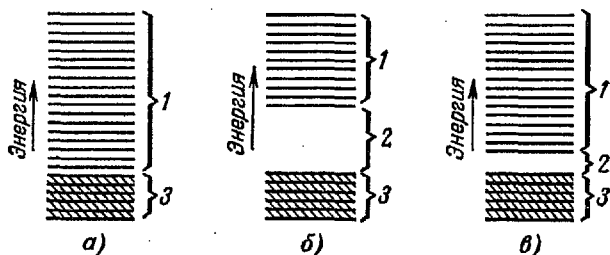


Рис. 1-3. Энергетические уровни.

а — проводник; б — диэлектрик; в — полупроводник; 1 — свободная зона; 2 — запрещенная зона; 3 — заполненная зона.

димость обуславливается тем, что заполненная зона вплотную прилегает к свободной зоне (рис. 1-3, а). Вследствие этого электроны в металле могут переходить с уровней заполненной зоны на уровни свободной зоны. Иначе говоря, электроны могут с менее удаленных от ядра орбит переходить на более удаленные орбиты или покидать пределы атома проводника, становясь свободными. Легко возникающая значительная концентрация электронов и обеспечивает большую электрическую проводимость проводников.

При электрическом напряжении, приложенном к концам металлического проводника, в нем возникает электрическое поле. Под влиянием сил этого поля движение свободных электронов упорядочивается, и они дрейфуют в направлении, противоположном направлению поля (так как имеют отрицательный заряд), т. е. в проводнике возникает электрический ток.

Если у данного вещества свободная зона отделена от заполненной (рис. 1-3, б) достаточно широкой запрещенной

зоной, то последняя делает практически невозможным переход электронов в свободную зону. Таким образом, как концентрация свободных электронов, так и проводимость вещества будут ничтожно малы и, следовательно, это будет диэлектрик.

У полупроводников ширина запрещенной зоны значительно уже, чем у диэлектриков (рис. 1-3, в). Следовательно, для перехода электронов в свободную зону требуется небольшое возбуждение, например за счет усиления теплового движения атомов при повышении температуры, в связи с чем полупроводники обладают проводимостью, имеющей промежуточное значение между проводимостью проводников и диэлектриков.

Проводники, в которых электрический ток создается перемещением одних электронов, называются проводниками с электронной проводимостью или проводниками первого рода. Основными представителями их являются металлы и их сплавы.

Проводники, в которых электрический ток создается перемещением положительных и отрицательных ионов, называются проводниками с ионной проводимостью или проводниками второго рода — это электролиты, к которым относятся водные растворы кислот, солей и щелочей.

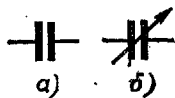
1-4. Электрическая емкость. Конденсаторы

Система из двух проводников (обкладок), разделенных диэлектриком, представляет собой электрический конденсатор.

Примерами естественных конденсаторов могут служить два провода электрической сети, две жилы кабеля, жила

Рис. 1-4. Условные обозначения конденсаторов.

а — с постоянной емкостью; б — с переменной емкостью.



кабеля — броня, проходной изолятор (изолирующий провод от стены или стенки металлического кожуха). Широко применяются изготавливаемые промышленностью конденсаторы различного устройства, в частности, плоские, образуемые параллельно расположенными металлическими изолированными друг от друга пластинами (обкладками).

Условные обозначения конденсаторов показаны на рис. 1-4.

Конденсаторы обладают свойством накапливать и удерживать на своих обкладках равные по величине и разные по знаку электрические заряды. Величина электрического заряда Q каждой из обкладок конденсатора пропорциональна напряжению U между обкладками, так что можно написать

$$Q = CU.$$

Величина C , равная отношению заряда одной из обкладок конденсатора к напряжению между ними, называется электрической емкостью конденсатора и является одним из его параметров.

Таким образом, емкость

$$C = Q/U. \quad (1-6)$$

Так как в системе СИ единицей заряда служит кулон, а единицей напряжения — вольт, то единица измерения емкости равна кулону, деленному на вольт. Она носит название фарада (Φ)

$$1\Phi = 1\text{Кл}/1\text{В}.$$

Обычно пользуются более мелкими единицами — микрофарадой ($1\text{ мк}\Phi = 10^{-6}\Phi$) или пикофарадой ($1\text{ п}\Phi = 10^{-12}\Phi$).

Рис. 1-5. Плоский конденсатор.

Емкость конденсатора зависит от формы и размеров его обкладок — электродов, их взаимного расположения и расстояния между ними и свойств диэлектрика, разделяющего обкладки.

Например, емкость плоского конденсатора, обкладки которого (рис. 1-5) расположены в вакууме,

$$C = \epsilon_0 S/d,$$

где S — поверхность каждой из обкладок, м^2 ; d — расстояние между обкладками, м ; ϵ_0 — электрическая постоянная.

Единица измерения электрической постоянной

$$|\epsilon_0| = \left| \frac{Cd}{S} \right| = \frac{\Phi \cdot \text{м}}{\text{м}^2} = \frac{\Phi}{\text{м}}.$$

Таким образом, электрическая постоянная измеряется в *фарадах на метр*.

Электрическая постоянная зависит от системы единиц. В системе СИ она имеет значение

$$\epsilon_0 \approx \frac{10^{-9}}{36\pi} = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м.} \quad (1-7)$$

Если пространство между обкладками плоского конденсатора заполнить каким-либо веществом — диэлектриком, то емкость конденсатора увеличится в ϵ раз и может быть найдена по формуле

$$C = \epsilon_0 \epsilon S/d = \epsilon_a S/d. \quad (1-8)$$

Множитель ϵ , называемый *диэлектрической проницаемостью*, является отвлеченным числом. Диэлектрическая проницаемость некоторых диэлектриков дана в табл. 1-1 (см. стр. 22).

Произведение электрической постоянной ϵ_0 и диэлектрической проницаемости ϵ называется *абсолютной диэлектрической проницаемостью*.

$$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon.$$

Наша промышленность выпускает конденсаторы различной емкости (1 пФ — 0,001 Ф), на различные номинальные напряжения до 100 кВ, различного устройства и назначения.

Для цепей постоянного и переменного тока применяются бумажные, слюдяные, керамические конденсаторы, а электролитические конденсаторы применяются только в цепях постоянного тока.

Бумажные конденсаторы (рис. 1-6) состоят из двух длинных лент алюминиевой фольги, изолированных лентами парафинированной бумаги.

Диэлектриком электролитического конденсатора служит очень тонкий слой окиси на поверхности алюминиевой фольги одной из обкладок конденсатора. Второй обкладкой является бумага или ткань, пропитанная густым раствором электролита.

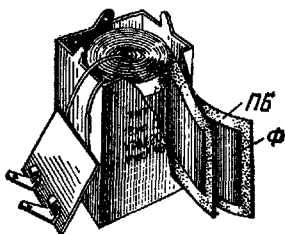


Рис. 1-6. Бумажный конденсатор.

Ф — фольга; ПБ — парафинированная бумага.

1-5. Соединение конденсаторов

Для получения нужной емкости или при напряжении сети, превышающем номинальное напряжение конденсатора, они соединяются последовательно, параллельно или смешанно.

При последовательном соединении (рис. 1-7) на электродах всех конденсаторов будут одинаковые по величине заряды, так как от источника питания они поступают только на внешние электроды, а на внутренних электродах они получают только за счет разделения зарядов, ранее нейтрализовавших друг друга.

Рис. 1-7. Последовательное соединение конденсаторов.

Обозначив заряд одного электрода конденсатора через Q , можно написать для двух последовательно соединенных конденсаторов

$$U_1 = \frac{Q}{C_1} \text{ и } U_2 = \frac{Q}{C_2},$$

т. е. при различных значениях емкостей напряжения на конденсаторах будут различны.

Выражая напряжение на зажимах цепи

$$U = U_1 + U_2$$

через отношение зарядов к емкости конденсаторов, получаем:

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2},$$

или, сокращая на Q , получаем:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}, \quad (1-9)$$

откуда общая или эквивалентная емкость двух последовательно соединенных конденсаторов

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad (1-10)$$

При параллельном соединении конденсаторов (рис. 1-8) напряжения на всех конденсаторах одинаковы, а заряды в общем случае имеют разные значения:

$$Q_1 = C_1 U \text{ и } Q_2 = C_2 U.$$

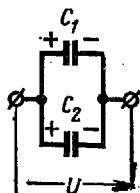
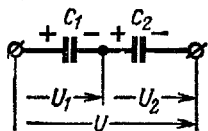


Рис. 1-8. Параллельное соединение конденсаторов.

Заряд, полученный всеми параллельно соединенными конденсаторами, равен сумме зарядов отдельных конденсаторов, т. е. в случае двух параллельно соединенных конденсаторов

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

откуда общая или эквивалентная емкость

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q_1 + Q_2}{U} = C_1 + C_2, \quad (1-11)$$

т. е. равна сумме емкостей отдельных конденсаторов.

При другом числе последовательно или параллельно соединенных конденсаторов, пользуясь формулами (1-9) и (1-11), нетрудно определить эквивалентные емкости.

Пример 1-1. Определить эквивалентную емкость двух конденсаторов при последовательном и параллельном соединении их: $C_1 = 2$ мкФ; $C_2 = 4$ мкФ.

Решение.

Эквивалентная емкость при последовательном соединении конденсаторов

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{2 \cdot 4}{2 + 4} = 1,33 \text{ мкФ.}$$

Эквивалентная емкость при параллельном соединении конденсаторов

$$C = C_1 + C_2 = 2 + 4 = 6 \text{ мкФ.}$$

1-6. Энергия электрического поля

При увеличении напряжения на конденсаторе, подключенном к источнику питания, увеличиваются заряды на его обкладках и напряженность поля в диэлектрике конденсатора. При этом естественно увеличивается и энергия электрического поля конденсатора за счет поступления ее от источника питания.

Увеличению напряжения на конденсаторе на du_C соответствует приращение энергии электрического поля конденсатора (1-3)

$$dw_C = dA = q du_C.$$

Вся энергия W_C , накопленная в электрическом поле конденсатора при возрастании напряжения на его зажимах от $u_C = 0$ до $u_C = U_C$, может быть найдена суммированием элементарных энергий dw_C . Таким образом, энергия

электрического поля конденсатора

$$W_C = \int_{u_C=0}^{u_C=U_C} q du_C = C \int_{u_C=0}^{u_C=U_C} u_C du_C = \frac{CU_C^2}{2} = \frac{QU_C}{2}. \quad (1-12)$$

Если заряженный конденсатор отключить от источника питания, а затем его обкладки замкнуть проводником, то произойдет разрядка, а кратковременный разрядный ток выделит в проводнике количество тепла, эквивалентное потенциальной энергии поля заряженного конденсатора.

Пример 1-2. Определить энергию, запасенную в электрическом поле конденсатора емкостью 10 мкФ, если напряжение на конденсаторе 300 В.

Решение.

Энергия электрического поля

$$W_C = \frac{CU_C^2}{2} = \frac{100 \cdot 300^2}{10^6 \cdot 2} = 5 \text{ Дж.}$$

1-7. Поляризация диэлектрика

При внесении диэлектрика в электрическое поле под действием сил поля орбиты электронов смещаются в направлении, противоположном полю, вследствие чего ядра атомов оказываются уже не в центрах электронных

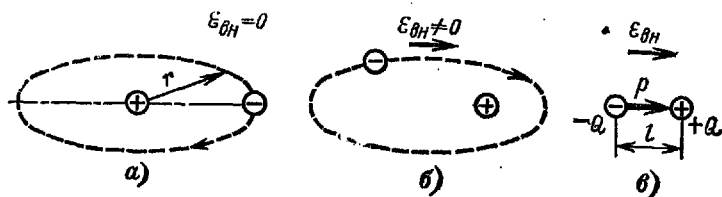


Рис. 1-9. Неполлярная молекула.

а — при отсутствии внешнего поля; *б* — при наличии внешнего поля; *в* — ее эквивалентный диполь.

орбит (рис. 1-9, *а*), а на некотором расстоянии от них (рис. 1-9, *б*).

С точки зрения электрических свойств такой атом (молекулу) можно рассматривать как электрический диполь, т. е. как пару разноименных точечных зарядов $+Q$ и $-Q$ (рис. 1-9, *в*), находящихся на небольшом расстоянии l друг от друга (плечо диполя). Заряды, образующие диполи диэлектрика, называются связанными, а произве-

дение величины заряда Q и плеча l — электрическим моментом диполя

$$p = Ql.$$

Электрический момент — векторная величина, направленная от отрицательного заряда диполя к положительному. Таким образом, молекулы во внешнем поле становятся диполями, электрические моменты p которых стремятся расположиться в направлении внешнего поля. При исчезновении поля исчезает и смещение электронных орбит. Явление смещения называется поляризацией диэлектрика.

Поляризованные молекулы создают свое электрическое поле, направленное противоположно основному, в результате происходит ослабление основного поля. Способность диэлектрика поляризоваться под действием электрического поля оценивается диэлектрической проницаемостью, которая показывает, во сколько раз ослабляется основное поле вследствие поляризации.

У диэлектрика, расположенного в периодически изменяющемся электрическом поле, смещение также будет периодическим, что влечет за собой его нагревание.

Чем чаще изменяется электрическое поле, тем сильнее нагревается диэлектрик. Это явление используется для нагревания диэлектриков с целью их сушки или получения химических реакций, требующих повышенной температуры. Мощность, идущая на нагрев диэлектрика, обусловленная периодическим смещением и отнесенная к единице объема, называется удельными диэлектрическими потерями.

Повышая напряженность электрического поля, в котором расположен диэлектрик, можно достигнуть такого значения ее, при котором произойдет пробой диэлектрика, т. е. местное разрушение его. Эта напряженность поля называется пробивной напряженностью $E_{пр}$ или электрической прочностью диэлектрика, а напряжение при пробое пробивным напряжением $U_{пр}$.

Характер пробоя может быть различным.

При электрическом пробое немногие, в начальный момент свободные электроны в диэлектрике под действием электрического поля достигают определенной критической скорости, достаточной для отщепления новых электронов от нейтральных атомов и молекул диэлектрика — возни-

кает ударная ионизация, приводящая к пробое.

При тепловом пробое происходит разогрев диэлектрика в электрическом поле, при котором происходит термическое повреждение или разрушение, например растрескивание, обугливание и т. д. Причиной разогрева могут быть диэлектрические потери или увеличение электропроводности диэлектрика и значительное не пропорциональное возрастание объемного тока (см. § 2-4) при повышении напряжения.

Прочность диэлектрика зависит от ряда условий: рода напряжения, скорости изменения его, продолжительности действия напряжения, формы электрического поля (формы электродов), толщины диэлектрика, его температуры, влажности, а у газов и от давления.

Для надежности работы электроустановки необходимо, чтобы все диэлектрики ее работали при напряженностях, не выше допустимых, которые должны быть в несколько раз меньше пробивных. Электрическая прочность некоторых диэлектриков приведена в табл. 1-1.

Пример 1-3. Лист электрокартона толщиной 0,3 см зажат между двумя плоскими металлическими электродами. Определить допускаемое и пробивное напряжения. Допускаемое напряжение должно быть в 3 раза меньше пробивного.

Решение.

По табл. 1-1 находим пробивную напряженность для электрокартона $\mathcal{E}_{пр} = 100 \cdot 10^3$ В/см.

Пробивное напряжение

$$U_{пр} = \mathcal{E}_{пр} d = 100 \cdot 0,3 = 30 \text{ кВ.}$$

Допустимое напряжение

$$U_{доп} = U_{пр}/3 = 30/3 = 10 \text{ кВ.}$$

1-8. Электроизоляционные материалы

Электроизоляционными называются вещества — диэлектрики, обладающие ничтожной электрической проводимостью, способные поляризоваться в электрическом поле. В них возможно длительное существование электростатического поля и накопление потенциальной электрической энергии.

Электроизоляционные материалы применяются для изоляции проводниковых элементов или частей электрических машин, аппаратов, приборов и т. д., находящихся под разными потенциалами.

К электроизоляционным материалам предъявляются весьма разнообразные требования, главные из которых: 1) достаточная электрическая прочность (см. ниже); 2) большие удельные объемное и поверхностное сопротивления (см. § 2-4); 3) высокая диэлектрическая проницаемость; 4) малые диэлектрические потери. Кроме того, имеют значение механические, термические и другие свойства.

В соответствии с разнообразием требований в электро-технике применяются много различных электроизоляционных материалов.

Электроизоляционные материалы можно разделить на группы по разным признакам, например: 1) по их агрегатному состоянию — на газообразные, жидкие, твердые; 2) по их химической природе — на органические и неорганические; 3) по их нагревостойкости — на классы и т. д.

а) Газообразные диэлектрики. Главным из газообразных изоляторов является воздух. При нормальной температуре ($+20^{\circ}\text{C}$) и нормальном давлении 0,1 МПа (760 мм рт. ст.) электрическая прочность воздуха ($30 \times 10^3 \text{ В/см}$) меньше, чем у большинства жидких и твердых диэлектриков. Поэтому иногда наблюдается пробой воздушного промежутка непосредственно у поверхности изолятора, который называется *поверхностным разрядом*.

Из других газов в качестве изоляции применяются *водород, углекислый газ, азот и инертные газы: аргон, неон и др.*

б) Жидкие диэлектрики. К жидким диэлектрикам относятся: минеральные масла, синтетические жидкости, смолы, лаки.

Минеральные масла являются продуктами перегонки нефти и представляют собой смеси жидких углеводородов. Они применяются в масляных трансформаторах, масляных выключателях, кабелях и конденсаторах.

В трансформаторах масло служит для изоляции токоведущих частей и для охлаждения путем конвекции, т. е. переноса тепла при циркуляции масла.

В масляных выключателях масло способствует гашению электрической дуги при разрыве цепи.

В кабелях и конденсаторах масло применяется для пропитки бумажной изоляции.

Масло должно иметь высокую электрическую прочность (100—200 кВ/см). Она резко падает при наличии влаги, поэтому перед заливкой и периодически при эксплуатации

масло должно высушиваться и очищаться. Некоторые характеристики масла даны в табл. 1-1.

Таблица 1-1

Характеристика некоторых электроизоляционных материалов

Диэлектрик	$\epsilon_{\text{пр}}$	ϵ	ρV
	10^3 В/см	—	Ом·м
Бумага, пропитанная маслом	100—250	3,6	—
Воздух	30	1	—
Гетинакс	100—150	4—7	$10^8—10^{10}$
Миканит	150—400	5—6	$10^9—10^{11}$
Поливинилхлорид	325	3,2	10^{12}
Резина	150—200	3—6	$10^{11}—10^{12}$
Стекло	100—150	6—10	10^{12}
Слюда	500—1 000	5,4	$5 \cdot 10^{11}$
Совол	150	5,3	$10^{11}—10^{12}$
Трансформаторное масло	50—180	2—2,5	$5 \cdot 10^{12}—5 \cdot 10^{13}$
Фарфор	150—200	5,5	$10^{12}—10^{13}$
Электрокартон	80—120	3—5	$10^6—10^8$

Искусственный жидкий диэлектрик совол, представляющий смесь молекул дифенила разной степени хлорирования, применяется взамен минерального масла для пропитки и заполнения конденсаторов, при этом емкость конденсаторов повышается в 2 раза.

Для заполнения трансформаторов применяют совол, который представляет собой совол, разбавленный трихлорбензолом. Так как он негорюч, то залитые им трансформаторы безопасны в пожарном отношении.

Смолы при низких температурах — это аморфные стеклообразные массы. При нагреве они размягчаются и становятся пластичными, а затем жидкими. Смолы не гигроскопичны и не растворяются в воде, но растворяются в спирте и других растворителях. Смолы являются важнейшей составной частью многих лаков, компаундов, пластмасс, пленок.

Природные смолы — это продукт жизнедеятельности некоторых насекомых (например, шеллак) или растений — смолоносов. Наибольшее значение имеют синтетические смолы, например полиэтилен, поливинилхлорид (см. табл. 1-1), которые применяются для изоляции проводов, кабелей, для защитных покрытий, для изготовления лаков.

Лаки представляют собой растворы пленкообразующих веществ: смол, битумов, высыхающих растительных масел

(например льняного), эфиров целлюлозы. В процессе сушки происходит образование лаковой плески. Лаки применяются для пропитки обмоток с целью защиты от влаги и химически активной среды, а также для склеивания листочков слюды между собой или с бумагой и тканью.

в) Т в е р д ы е д и э л е к т р и к и. Твердые диэлектрики составляют наиболее многочисленную группу изоляционных материалов (см. табл. 1-1).

1. Волокнистые органические материалы: бумаги, картон, фибра, ткани изготавливаются из волокон древесины, хлопка, капрона.

Они обладают гибкостью, достаточной механической прочностью и гигроскопичностью, для уменьшения которой применяется пропитка минеральным маслом или компаундом.

Бумага изготавливается в основном из древесины. Промышленность выпускает бумагу кабельную, конденсаторную, намоточную для изготовления бакелитовых изделий, оклеечную для изоляции листов электротехнической стали и др.

Электрокартон (прессшпан) изготавливается из целлюлозы и подвергается прессованию. Он широко применяется для прокладок в электрических машинах, трансформаторах и других электротехнических изделиях.

Фибра изготавливается из пористой бумаги путем обработки ее хлористым цинком. Применяется для изготовления панелей, стоек, втулок и т. д.

Гетинакс — это много слоев прессованной бумаги, пропитанных бакелитовым лаком.

Текстолит представляет собой прессованную многослойную ткань, пропитанную бакелитовым лаком. После пропитки материал подвергается нагреванию, после которого лак отвердевает.

2. Пластмассы — материалы, состоящие из двух составных частей — связующей и наполнителя. Связующей служат смолы или битумы, а также жидкое стекло или цемент.

Пластмассы широко применяются в электротехнике в качестве изоляционных и конструкционных материалов.

3. Эластомерами называют материалы, обладающие свойствами эластичности, т. е. сильно удлиняться при растяжении и принимать прежние размеры при снятии нагрузки.

Каучук натуральный и синтетический обладает высокой эластичностью и малой проницаемостью для влаги и газов.

Резина — эластичный материал, получается путем введения в каучук серы. При содержании серы 1—3% полу-

чается мягкая эластичная резина, при содержании серы 25—50% получается твердая резина — эбонит, неэластичный, но хорошо поддающийся обработке материал.

Последнее время резина с успехом заменяется пластмассами — эластомерами, например поливинилхлоридом, полиэтиленом, более стойкими к действию щелочей, кислот, минеральных масел.

3. Стекло получается плавлением кремнезема (SiO_2) со щелочами натрия, калия, кальция, с последующим охлаждением. Обычное стекло обладает хрупкостью. Специальные сорта стекла, например, сталинит, имеют высокую прочность.

Стекло в электротехнике применяется для изготовления изоляторов, а также колб ламп накаливания и электронных ламп.

Стекловолоконное и стеклопрядное применяются, например, в качестве изоляции проводов, предназначенных для работы при высокой температуре.

4. Электрофарфор изготавливается из каолина, огнеупорной глины, кварца, полевого шпата. Фарфоровые изделия покрываются глазурью для уменьшения гигроскопичности и обжигаются.

Фарфор имеет высокие механическую и электрическую прочность и нагревостойкость. Он широко применяется для изготовления низковольтных и высоковольтных изоляторов.

5. Слюда — это минерал кристаллической структуры, легко расщепляющийся на тонкие листочки. Она обладает высокими нагревостойкостью, влагостойкостью и прекрасными электроизоляционными свойствами (см. табл. 1-1).

Миканит — склеенные лаком или смолой листочки слюды — применяется для различных прокладок и для изготовления фасонных деталей путем формовки.

6. Парафин — продукт переработки нефти — не гигроскопичен, плавится при 55°C . Применяется для пропитки бумаги, картона, дерева с целью уменьшения их гигроскопичности.

Глава вторая

Электрические цепи постоянного тока

2-1. Электрический ток

Свободные электроны в металлическом проводнике (проводник первого рода) при отсутствии внешнего электрического поля находятся в состоянии беспорядочного

движения, и количество электричества, переносимого через какое-либо поперечное сечение проводника, в среднем равно нулю.

При наличии в проводнике электрического поля напряженностью $\mathcal{E} = U/l$, направленного вдоль провода, на свободные электроны действуют силы этого поля и они приобретают ускорение в направлении, противоположном направлению поля. Таким образом, на беспорядочное движение электронов накладывается равномерно ускоренное движение в указанном направлении. Ускоренное движение происходит до тех пор, пока электрон не столкнется с ионом кристаллической решетки металла провода, после чего процесс начнет повторяться. Если максимальная продольная скорость движения электрона v_m , то средняя продольная скорость его $v_{cp} = \frac{0 + v_m}{2}$. Следова-

тельно, при наличии в проводе продольного электрического поля через любое поперечное сечение провода будет проходить определенное количество электричества. Явление движения заряженных частиц под действием электрического поля в проводнике называется **электрическим током**.

Проводники второго рода — **электролиты**, это растворы кислот, солей и щелочей.

Часть молекул электролита под действием растворителя распадается на положительные и отрицательные ионы, которые подобно электронам в металле перемещаются по объему проводника. Молекулы водорода и металлов образуют положительные ионы, а молекулы неметаллических остатков электролитов — отрицательные ионы.

Приложим электрическое напряжение к двум электродам, погруженным в электролит (рис. 2-1). Под действием электрического поля положительные ионы будут перемещаться к отрицательному электроду (катоде), а отрицательные ионы — к аноду. Это движение положительных и отрицательных ионов в электролите под действием электрического поля и представляет собой **электрический ток**. Достигнув электродов, ионы или оседают на них, или вступают с ними в химическую реакцию. Отрицательные ионы электролита отдают аноду свои электроны, которые и будут дви-

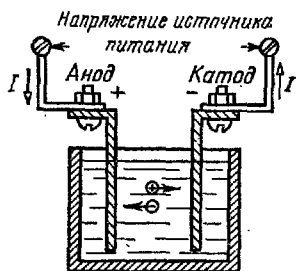


Рис. 2-1. Ток в электролите.

гаться дальше по цепи. Положительные ионы электролита соединяются со свободными электронами катода, поступающими из цепи. Таким образом, в проводах, идущих от источника питания, возникает движение свободных электронов в направлении к катоду.

Прохождение тока в электролитах связано с перемещением составных частей их вещества.

По закону Фарадея *количество выделенного вещества G пропорционально количеству электричества, прошедшему через электролит*, т. е.

$$G = cQ. \quad (2-1)$$

Здесь c — коэффициент пропорциональности, называемый **э л е к т р о х и м и ч е с к и м э к в и в а л е н т о м**, равный числу килограмм вещества, выделяемого на катоде зарядом в один кулон. Для различных веществ он имеет разные значения, например, для серебра $1,118 \cdot 10^{-6}$ кг/Кл, для меди $0,329 \cdot 10^{-6}$ кг/Кл.

Процесс выделения вещества из электролита называется **э л е к т р о л и з о м**. Он широко применяется для получения чистых металлов (медь, алюминий).

Интенсивность электрического тока характеризуется величиной, называемой **с и л о й т о к а ***.

Сила тока численно равна количеству электричества, проходящему через поперечное сечение проводника в единицу времени. Ток, не изменяющийся ни по величине, ни по направлению, называют **п о с т о я н н ы м т о к о м** и обозначают прописной буквой I .

Если заряд Q проходит через поперечное сечение проводника за время t , то сила тока

$$I = Q/t. \quad (2-2)$$

Изменяющийся по времени ток в отличие от постоянного называют **п е р е м е н н ы м т о к о м** и обозначают строчной буквой i .

Единицей силы тока, в системе СИ, является **а м п е р (А)**.

Сила тока равна 1 А, если через поперечное сечение проводника за 1 с проходит электрический заряд 1 Кл, т. е.

$$1\text{А} = 1\text{Кл/с}.$$

* Термин *ток* применяется в качестве синонима термина *сила тока*.

Положительным направлением тока называют направление, в котором перемещаются положительные заряды, или направление, противоположное движению электронов.

2-2. Электрическая цепь и ее элементы

Совокупность устройств для получения в них электрического тока называется э л е к т р и ч е с к о й ц е п ь ю. В основном цепь состоит из источников питания, приемников энергии или потребителей и проводов для передачи электрической энергии.

На рис. 2-2 дано графическое изображение простейшей цепи, т. е. ее э л е к т р и ч е с к а я с х е м а. Источник питания I составляет внутренний участок цепи, а остальная часть ее $ABVG$, состоящая из потребителя Π и проводов AB и BG — внешнюю часть ее.

В табл. 2-2 даны условные обозначения, применяемые в электрических схемах согласно ГОСТ 2.722-68—2.751-68.

В качестве источников питания применяются электромашины генераторы, преобразующие механическую энергию в электрическую, аккумуляторы и первичные элементы, преобразующие химическую энергию в электрическую и др.

К потребителям электрической энергии (электроприемникам) относятся например: электродвигатели, преобразующие электрическую энергию в механическую; электролитические ванны для получения чистых металлов, преобразующие электрическую энергию в химическую; лампы накаливания и нагревательные устройства, преобразующие электроэнергию соответственно в световую и тепловую и т. д.

В источнике питания происходит преобразование какого-либо вида энергии в электрическую. В результате работы сторонних (не электрических) сил каждый единичный заряд при движении внутри источника приобретает некоторое количество энергии. Электродвижущей силой (э. д. с.) называется величина, численно равная энергии, получаемой

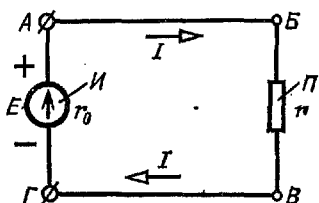
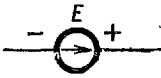
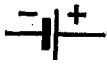
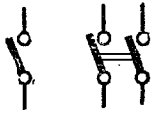
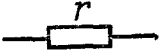
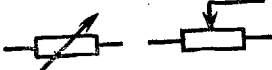


Рис. 2-2. Схема электрической цепи.

Условные графические обозначения, применяемые в электрических схемах

(по ГОСТ 2.722-68—2.751-68)

Наименование	Условный знак
Источник электрической энергии, источник э. д. с.	
Электрический генератор постоянного тока	
Электрический двигатель постоянного тока	
Химический источник энергии (гальванический элемент или аккумулятор)	
Электрическая лампа	
Провод, кабель, шина электрической цепи	
Соединение электрическое, соединение разъёмное и неразъёмное, соединение разъёмное	
Выключатель однополюсный и двухполюсный	
Предохранитель плавкий	

Наименование	Условный знак
Приемник электрической энергии, резистор	
Реостат или регулируемый резистор	
Амперметр, вольтметр, ваттметр	

внутри источника единицей электрического заряда. При отключенной внешней цепи э. д. с. E равна напряжению между зажимами источника.

В электроприемниках электрическая энергия преобразуется в тепловую, механическую или химическую. При этом напряжение U на зажимах электроприемника показывает, какая электрическая энергия преобразуется (расходуется) в нем каждым единичным зарядом.

Разность между э. д. с. E и напряжением U представляет собой энергию, которая преобразуется в тепло (теряется) при перемещении единичного заряда в источнике питания и называется внутренним падением напряжения U_0 , следовательно:

$$E - U = U_0 \text{ или } E = U + U_0. \quad (2-3)$$

Напряжение от источника питания к потребителям передается по проводам. Потерей энергии в коротких проводах иногда пренебрегают, как это сделано и в нашем случае.

Провода применяются алюминиевые и медные, изолированные и неизолированные.

Кроме трех рассмотренных элементов электрических цепей в них применяются: коммутационная аппаратура — рубильники, выключатели, контакторы; приборы защиты — плавкие предохранители, реле; измерительные приборы — амперметры, вольтметры, ваттметры и т. д.

2-3. Закон Ома

Отношение силы тока I к площади поперечного сечения S провода, по которому он проходит, называется плотностью тока, т. е.

$$\delta = \frac{I}{S}. \quad (2-4)$$

Следовательно, плотность тока в проводе определяется зарядом, проходящим через единицу поперечного сечения провода в секунду, который пропорционален скорости движения заряженных частиц вдоль провода. Скорость же движения частиц пропорциональна силам поля, действующим на эти частицы, т. е. напряженности электрического поля. Таким образом, плотность тока ¹ в проводе пропорциональна напряженности электрического поля, т. е.

$$\delta = \gamma \mathcal{E}. \quad (2-5)$$

Коэффициент пропорциональности $\gamma = \delta / \mathcal{E}$ называется удельной электрической проводимостью.

Приняв во внимание, что $\mathcal{E} = U/l$, напишем:

$$\delta = \gamma U/l.$$

Умножив правую и левую части последнего уравнения на площадь поперечного сечения провода, получим:

$$I = U \frac{\gamma S}{l} = \frac{U}{r}, \quad (2-6)$$

где величина

$$r = l/(\gamma S) \quad (2-7)$$

называется электрическим сопротивлением провода.

Из (2-6) следует, что сила тока в проводе прямо пропорциональна напряжению на его концах и обратно пропорциональна сопротивлению провода.

Выражение (2-6) представляет собой закон Ома — один из основных законов электротехники, широко применяемый для расчета цепей.

Если приемник энергии обладает сопротивлением r (рис. 2-2), а источник питания — внутренним сопротивлением r_0 , то для цепи, показанной на рис. 2-2, напишем (2-3):

$$E = U + U_0 = Ir + Ir_0 = I(r + r_0), \quad (2-8)$$

¹ Единицей плотности тока в системе СИ является 1 А/м^2 или кратная ей единица $1 \text{ А/мм}^2 = 10^6 \text{ А/м}^2$.

откуда получаем выражение закона Ома для всей электрической цепи:

$$I = \frac{E}{r + r_0}. \quad (2-9)$$

Напряжение на зажимах цепи (рис. 2-2) при нагрузке

$$U = E - U_0 = E - Ir_0. \quad (2-10)$$

Напряжение на зажимах той же цепи при отключенной нагрузке, т. е. при токе $I = 0$, равно э. д. с. источника

$$U = E - Ir_0 = E.$$

2-4. Электрические сопротивление и проводимость

При прохождении электрического тока по проводнику движущиеся свободные электроны (ионы), сталкиваясь с атомами или молекулами проводника, испытывают при этом противодействие своему движению, которое характеризует сопротивление проводника. Сопротивление согласно (2-6) оценивают отношением напряжения, приложенного к концам проводника, к силе тока в нем, т. е. сопротивление

$$r = U/I. \quad (2-11)$$

Единицей измерения сопротивления в системе СИ служит ом (Ом):

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

Сопротивлением 1 Ом обладает проводник, в котором при напряжении 1 В проходит ток 1 А.

Величина, обратная удельной проводимости, называется удельным сопротивлением ρ , т. е.

$$\rho = \frac{1}{\gamma}. \quad (2-12)$$

Удельное сопротивление, так же как и удельная проводимость, зависит от свойств материала и его температуры.

Заменив в (2-7) удельную проводимость γ удельным сопротивлением, получим:

$$r = l/(\gamma S) = \rho l/S, \quad (2-13)$$

откуда удельное сопротивление

$$\rho = l/\gamma = rS/l. \quad (2-14)$$

Величина, обратная сопротивлению, называется электрической проводимостью

$$g = 1/r = \gamma S/l = I/U. \quad (2-15)$$

Единицей проводимости является с и м е н с:

$$1 \text{ См} = 1/\text{Ом}.$$

Единицей удельного сопротивления в системе СИ является Ом·м, так как

$$[\rho] = [rS/l] = \text{Ом} \cdot \text{м}^2/\text{м} = \text{Ом} \cdot \text{м}.$$

Удельные сопротивления для металлов при такой единице измерения выражаются очень малыми числами, что неудобно. Поэтому единицу удельного сопротивления определяют, измеряя длину провода в метрах, а сечение — в квадратных миллиметрах. При этих условиях единица удельного сопротивления

$$[\rho] = [rS/l] = \text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м},$$

причем $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м} = 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м} = 1 \text{ мкОм} \cdot \text{м}.$

Единица удельной проводимости.

$$[\gamma] = [1/\rho] = [l/(rS)] = \text{м}/\text{Ом} \cdot \text{мм}^2$$

или в системе СИ

$$[\gamma] = \frac{\text{сименс}}{\text{метр}} = \frac{\text{См}}{\text{м}}.$$

Значения удельных сопротивлений ряда материалов при температуре 20° С даны в табл. 2-2.

Таблица 2-2

Характеристики некоторых проводниковых электротехнических материалов

Материал	Температура плавления, °С	Удельное электрическое сопротивление при 20° С, мкОм·м = 10 ⁻⁶ Ом·м	Среднее значение температурного коэффициента сопротивления (от 0 до 100° С), °С ⁻¹
Алюминий	657	0,029	0,004
Бронза	900	0,021—0,4	0,004
Вольфрам	3 370	0,056	0,00464
Константан	1 200	0,4—0,51	0,000005
Латунь	900	0,07—0,08	0,002
Манганин	960	0,42	0,000006
Медь	1 083	0,0175	0,004
Нихром	1 360	1,1	0,00015
Сталь	1 400	0,13—0,25	0,006
Фехраль	1 450	1,4	0,00028
Хромаль	1 500	1,3	0,00004

В диэлектриках (электроизоляционных материалах) ток может проходить как через толщу диэлектрика, т. е. через объем материала — **объемный ток** I_V , так и по поверхности диэлектрика — **поверхностный ток** I_S . В соответствии с этим имеются два понятия: **объемное сопротивление** r_V и **поверхностное сопротивление** r_S .

Объемный ток в диэлектрике

$$I_V = \frac{U}{r_V} = \frac{U}{\rho_V \frac{l}{S}}$$

Удельное объемное сопротивление ρ_V численно равно сопротивлению диэлектрика сечением $S = 1 \text{ м}^2$ и длиной $l = 1 \text{ м}$. Таким образом, единицей объемного удельного сопротивления будет Ом·м, так как



$$[\rho_V] = [r_V S / l] = \text{Ом} \cdot \text{м}^2 / \text{м} = \text{Ом} \cdot \text{м}. \quad \text{Рис. 2-3. Резистор.}$$

Можно также определять удельное объемное сопротивление для кубика с ребром, равным 1 см, тогда $[\rho_V] 1 \text{ Ом} \cdot \text{см} = 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Значения удельных объемных сопротивлений ρ_V для ряда материалов даны в табл. 1-1.

Поверхностный ток

$$I_S = \frac{U}{r_S} = \frac{U}{\rho_S \frac{l}{d}} \quad (2-16)$$

Удельное поверхностное сопротивление ρ_S численно равно сопротивлению поверхности шириной $d = 1 \text{ м}$ и длиной $l = 1 \text{ м}$. Таким образом, единицей удельного поверхностного сопротивления будет 1 Ом, так как

$$[\rho_S] = [r_S d / l] = \text{Ом} \cdot \text{м} / \text{м} = \text{Ом}, \quad (2-17)$$

откуда видно, что она не зависит от размеров.

Устройства, предназначенные для включения в электрическую цепь с целью ограничения или регулирования тока в ней, называются **резисторами** (рис. 2-3) или **резистатами** (рис. 2-4). Они изготавливаются проволочными и непроволочными с постоянным значением сопротивления и регулируемые (переменными). Термин «сопротивление»

иногда раньше применялся как название устройства для ограничения тока в цепи.

Для нагревательных приборов, реостатов, резисторов применяется проволока из материалов с высоким удельным сопротивлением (табл. 2-2). Это позволяет при малой длине проволоки получить нужную величину сопротивления. Проволока в виде спирали накладывается на основание из керамики или другого изоляционного материала. Применение

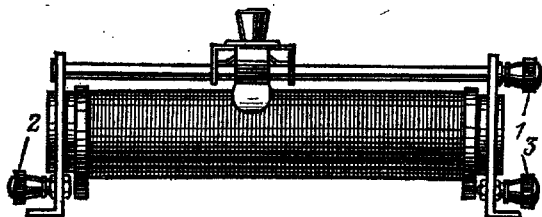


Рис. 2-4. Реостат.

подвижного контакта (1, рис. 2-4) позволяет изменять сопротивление, включенное в цепь (между контактами 1 и 2 или 1 и 3 рис. 2-4).

В непроволочных резисторах токоведущая часть выполняется в виде стержня или в виде пленки, накладываемой на поверхность каркаса из изоляционного материала.

Пример 2-1. Лампа накаливания с сопротивлением $r = 440$ Ом включена в сеть с напряжением $U = 110$ В. Определить силу тока в лампе.

Решение.

По закону Ома сила тока

$$I = \frac{110}{440} = 0,25 \text{ А.}$$

Пример 2-2. Определить напряжение на зажимах нагревательного прибора с сопротивлением $r = 44$ Ом, если сила тока в нем $I = 5$ А.

Решение.

Напряжение на зажимах прибора

$$U = Ir = 5 \cdot 44 = 220 \text{ В.}$$

2-5. Зависимость сопротивления от температуры

При повышении температуры проводника увеличивается число столкновений свободных электронов с атомами. Следовательно, уменьшается средняя скорость направленного движения электронов, что соответствует увеличению сопротивления проводника.

С другой стороны, при повышении температуры возрастает число свободных электронов и ионов в единице объема проводника, что приводит к уменьшению сопротивления проводника.

В зависимости от преобладания того или иного фактора при повышении температуры сопротивление или увеличивается (металлы), или уменьшается (уголь, электролиты), или остается почти неизменным (сплавы металлов, например манганин).

При незначительных изменениях температуры ($0-100^{\circ}\text{C}$) относительное приращение сопротивления $\Delta r/r$, соответствующее нагреванию на 1°C , называемое температурным коэффициентом сопротивления α , для большинства металлов остается постоянным.

Обозначив r_1 и r_2 — сопротивления при температурах Θ_1 и Θ_2 , можем написать выражение относительного приращения сопротивления при повышении температуры от Θ_1 до Θ_2 :

$$\frac{\Delta r}{r_1} = \frac{r_2 - r_1}{r_1} = \alpha (\Theta_2 - \Theta_1), \quad (2-18)$$

откуда

$$r_2 = r_1 + r_1 \alpha (\Theta_2 - \Theta_1) = r_1 [1 + \alpha (\Theta_2 - \Theta_1)]. \quad (2-19)$$

Значения температурного коэффициента сопротивления для различных материалов даны в табл. 2-2.

Из выражения (2-18) следует, что

$$\Theta_2 = \frac{r_2 - r_1}{r_1 \alpha} + \Theta_1. \quad (2-20)$$

Полученная формула (2-20) дает возможность определить температуру Θ_2 провода (обмотки), если измерить его сопротивление r_2 при заданных или известных величинах r_1 , Θ_1 и α .

Пример 2-3. Определить сопротивление проводов воздушной линии при температурах $+20$ и -10°C , если длина линии 400 м, а сечение медных проводов $S = 10 \text{ мм}^2 = 10 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$.

Решение.

Сопротивление проводов линии при температуре $+20^{\circ}\text{C}$

$$r_1 = \rho \frac{2l}{S} = 0,0175 \cdot 10^{-8} \frac{2 \cdot 400}{10 \cdot 10^{-6}} = 1,4 \text{ Ом}.$$

Сопротивление тех же проводов при температуре -10°C

$$r_2 = r_1 [1 + \alpha (\Theta_2 - \Theta_1)] = 1,4 [1 + 0,004 (-30)] = 1,232 \text{ Ом}.$$

Пример 2-4. Сопротивление медной обмотки электродвигателя при температуре $\Theta_1 = 20^{\circ}\text{C}$ составляет $r_1 = 1,2 \text{ Ом}$. После часовой

работы сопротивление той же обмотки $r_2 = 1,4$ Ом. Определить температуру обмотки электродвигателя после часовой работы.

Р е ш е н и е.

$$\Theta_2 = \frac{r_2 - r_1}{\alpha r_1} + \Theta_1 = \frac{1,4 - 1,2}{0,004 \cdot 1,2} + 20^\circ\text{C} \approx 62^\circ\text{C}.$$

2-6. Проводниковые материалы

Электротехнические проводниковые материалы делятся на две группы.

К первой группе относятся материалы с малым удельным сопротивлением. Они должны иметь малый температурный коэффициент сопротивления, достаточную механическую прочность и устойчивость в отношении коррозии.

М е д ь широко применяется вследствие малого удельного сопротивления (см. табл. 2-2), достаточной механической прочности, хорошей обрабатываемости и стойкости к коррозии. Она применяется в виде проволоки, проводов различного назначения, шин, полос. Электролитическая медь содержит не более 0,1% примесей.

Кроме чистой меди, в электротехнике применяются ее сплавы с другими металлами (кадмий, бериллий, цинк) — бронзы, латунь.

А л ю м и н и й, несмотря на худшие электрические и механические свойства (см. табл. 2-2), получил очень широкое распространение. При замене медных проводов алюминиевыми с одинаковыми сопротивлениями и длиной, сечение последних на 60% больше, а масса на 52% меньше медных.

Для линий электропередачи применяют алюминиевые провода с внутренними стальными проволоками (стале-алюминиевые).

С т а л ь, вследствие большого удельного сопротивления применяется только для проводов линий небольшой мощности и линий связи.

Ко второй группе материалов с высоким удельным сопротивлением относятся сплавы: никель — хром — железо (нихром); железо — хром — алюминий (фехраль) и др. Из-за стойкости к высоким температурам они применяются для изготовления нагревательных элементов, реостатов и т. д.

М а н г а н и н — сплав меди 86%, марганца 12% и никеля 2%. Малый температурный коэффициент сопротивления и большое удельное сопротивление манганина обеспечили применение его в измерительной технике (образцовые катушки сопротивлений и др.).

Электротехнический уголь в основном состоит из разновидностей углерода — графита и угля. Он применяется для щеток электрических машин, электродов, непроволочных резисторов.

2-7. Работа и мощность

В замкнутой электрической цепи (рис. 2-2) под действием э. д. с. источника питания непрерывно происходит движение электрических зарядов.

Из определения э. д. с., данного в § 2-2, следует, что работа, затраченная внешними силами на перемещение электрического заряда Q в источнике, или электрическая энергия, полученная за счет преобразования энергии другого вида,

$$A_{\text{и}} = W_{\text{и}} = EQ = EIt. \quad (2-21)$$

По закону сохранения энергии электрическая энергия, выработанная источником за время t , за то же время преобразуется в другие виды энергии во всех участках цепи.

Если напряжение на зажимах источника $U_{\text{АГ}} = U_{\text{ВВ}} = U$, то электрическая энергия, затраченная во внешней цепи,

$$W = UQ = UIt. \quad (2-22)$$

Часть энергии затрачивается (теряется) внутри источника на его нагревание

$$W_0 = W_{\text{и}} = -W = -(E - U)It = U_0It.$$

Разность э. д. с. E источника и напряжения $U_{\text{и}}$ на его зажимах, как известно из § 1-2, представляет собой внутреннее падение напряжения

$$U_0 = E - U. \quad (2-23)$$

Отношение работы A к времени t , в течение которого она выполнена, называется мощностью, т. е.

$$P = \frac{A}{t}. \quad (2-24)$$

Мощность — это скорость, с которой совершается работа, или скорость, с которой происходит преобразование энергии.

Скорость, с которой механическая или другая энергия преобразуется в источнике питания в электрическую, называется мощностью генератора (источника):

$$P_{\text{и}} = \frac{EIt}{t} = EI. \quad (2-25)$$

Скорость, с которой электрическая энергия преобразуется во внешнем участке цепи в другие виды энергии, называется мощностью электроприемника:

$$P = \frac{UIt}{t} = UI. \quad (2-26)$$

Мощность, определяющая непроизводительный расход электрической энергии в генераторе, называется мощностью потерь:

$$P_0 = \frac{W_0}{t} = \frac{U_0 It}{t} = U_0 I. \quad (2-27)$$

По закону сохранения энергии мощность генератора равна сумме мощностей приемников и мощности потерь в генераторе:

$$P_n = P + P_0. \quad (2-28)$$

В системе единиц СИ единицей мощности служит ватт (Вт), равный одному джоулю в одну секунду, или мощность, при которой в каждую секунду 1 Дж электрической энергии преобразуется в другой вид энергии, т. е.

$$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с},$$

или

$$1 \text{ Дж} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

Из (2-26) следует, что

$$[P] = [UI] = \text{В} \cdot \text{А};$$

таким образом,

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

т. е. ватт — это мощность при силе тока в 1 А и напряжении в 1 В.

Пример 2-5. Электродвигатель мощностью 10 кВт подключен к сети с напряжением 225 В. Определить силу тока электродвигателя.

Решение.

Мощность

$$P = UI,$$

откуда сила тока

$$I = \frac{P}{U} = \frac{10\,000}{225} \approx 44 \text{ А}.$$

Пример 2-6. В цепи питания нагревательного прибора, включенного под напряжение 220 В, сила тока 5 А. Определить мощность прибора и стоимость энергии, израсходованной прибором за 4 ч работы. Стоимость 1 кВт·ч электрической энергии 4 коп.

Решение.

Мощность прибора

$$P = UI = 220 \cdot 5 = 1\,100 \text{ Вт} = 1,1 \text{ кВт.}$$

Электрическая энергия, израсходованная прибором,

$$W = Pt = 1\,100 \cdot 4 = 4\,400 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 4,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

а ее стоимость

$$4 \cdot 4,4 = 17,6 \text{ коп.}$$

2-8. Преобразование электрической энергии в тепловую

При прохождении тока в проводнике с сопротивлением r происходит столкновение электрически заряженных частиц с ионами и молекулами вещества. При этом кинетическая энергия движущихся частиц передается ионам и молекулам, что и приводит к нагреванию проводника.

Скорость рассмотренного преобразования электрической энергии в тепловую характеризуется мощностью

$$P = UI,$$

имея в виду, что $U = Ir$, получаем:

$$P = I^2 r, \text{ или } P = U^2 / r. \quad (2-29)$$

Количество электрической энергии, переходящей в тепловую за время t ,

$$W = Pt = I^2 r t.$$



Э. Х. Ленц (1804—1865).

Так как в системе СИ единицей энергии и единицей количества тепла является джоуль, то выделенное током в сопротивлении r тепло

$$Q = I^2 r t. \quad (2-30)$$

Полученная зависимость была установлена опытным путем в 1844 г. русским академиком Э. Х. Ленцем и одновременно английским ученым Джоулем и называется **законом Джоуля — Ленца**: количество тепла, выделенное током в проводнике, пропорционально квадрату силы

тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока.

Преобразование электрической энергии в тепловую в электрических печах и различных нагревательных приборах имеет полезное применение. В электрических машинах и аппаратах преобразование электрической энергии в тепловую является непроизводительным расходом энергии, т. е. потерями энергии, снижающими их к. п. д. Тепло, вызывая нагрев этих устройств, ограничивает их нагрузку; при перегрузке повышение температуры может вызвать повреждение изоляции или сокращение срока службы установки.

Пример 2-7. Определить количество тепла, выделенного в приборе в течение 1 ч при сопротивлении прибора $r = 88$ Ом и напряжении на его зажимах $U = 220$ В.

Решение.

Сила тока

$$I = \frac{U}{r} = \frac{220}{88} = 2,5 \text{ А.}$$

Количество тепла, выделенного в приборе,

$$Q = I^2 r t = 2,5^2 \cdot 88 \cdot 1 \cdot 3600 = 1\,980\,000 \text{ Дж} = 1,98 \text{ МДж.}$$

2-9. Электрическая нагрузка проводов и защита их от перегрузки

В начале нагревания провода током вследствие равенства температур провода и окружающей среды все тепло, выделенное током, идет на нагревание провода и температура его быстро повышается. С ростом температуры провода увеличивается отдача тепла проводом в окружающую среду, обусловленная возрастающей разностью температур провода и среды. Следовательно, рост температуры провода замедляется. Наконец, при некоторой температуре провода, называемой *установившейся*, наступает равновесие между теплом, выделяемым током, и теплом, отдаваемым в окружающую среду. Время нагревания до установившейся температуры неодинаково для различных устройств: нить лампы накаливания достигает этой температуры за доли секунды, электрическая машина — за несколько часов.

Нагрев проводов допускается до определенных температур ($65\text{--}80^\circ\text{C}$), определяемых свойствами изоляции или свойствами самих проводов. Ток, при котором достигается установившаяся наибольшая допустимая температура, на-

зывается допустимым током провода (табл. 2-3).

Определение сечения проводов по допустимому нагреву их производится по приведенной таблице, в которой для стандартных сечений изолированных проводов даются пре-

Таблица 2-3

Длительно допустимые нагрузки на провода и шины с резиновой или поливинилхлоридной изоляцией с медными и алюминиевыми жилами

Сечение токопроводящей жилы, мм ²	Токовые нагрузки, А					
	Провода, проложенные открыто	Провода, проложенные в одной трубе				
		Два одно- жильных	Три одно- жильных	Четыре одно- жильных	Один двух- жильный	Один трех- жильный
0,5	11/—	—	—	—	—	—
0,75	15/—	—	—	—	—	—
1,0	17/—	16/—	15/—	14/—	15/—	14/—
1,5	23/—	19/—	17/—	16/—	18/—	15/—
2,5	30/24	27/20	25/19	25/19	25/—	21/—
4	41/32	38/28	35/28	30/23	32/—	27/—
6	50/39	46/36	42/32	40/30	40/—	34/—
10	80/55	70/50	60/47	50/39	55/—	50/—
16	100/80	85/60	80/60	75/55	80/—	70/—
25	140/105	115/85	100/80	90/70	100/—	85/—

Примечание. Числитель — нагрузки для медных жил, знаменатель — для алюминиевых жил.

дельные длительно допустимые токи I_d . Провод выбирается такого сечения, чтобы допустимый ток его был равен или несколько больше заданного или *расчетного тока*:

$$I_d \geq I_p.$$

Коротким замыканием называется соединение двух проводов разного потенциала через ничтожно малое сопротивление. Ток короткого замыкания, в десятки раз превышающий номинальный ток установки, может вызвать механические или тепловые повреждения отдельных ее частей.

Участки электрической цепи защищаются от токов перегрузки и короткого замыкания плавкими предохранителями (§ 11-10) или реле (§ 11-13). Плавкая вставка предохранителя содержит кусок проволоки, которая при определенном токе перегрузки плавится, разрывая цепь тока.

2-10. Потеря напряжения в проводах

При передаче электрической энергии по коротким проводам сопротивлением их можно пренебречь. При большей длине их ($l > 10$ м) сопротивлением проводов пренебрегать нельзя, так как прохождение тока вызовет в них заметное падение напряжения:

$$\Delta U = Ir = I \frac{2l}{\gamma S}. \quad (2-31)$$

Разность напряжений в начале и конце линии (рис. 2-5) $U_1 - U_2$, равная падению напряжения в проводах, называется потерей напряжения:

$$U_1 - U_2 = \Delta U = Ir. \quad (2-32)$$

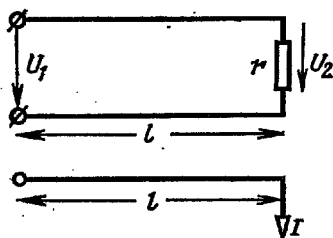


Рис. 2-5. Двухпроводная линия с нагрузкой на конце.

При неизменном напряжении в начале линии напряжение в конце линии, т. е. на приемнике, изменяется от $U_2 = U_1$ при $I = 0$ до $U_2 = U_1 - \Delta U$ при нагрузке.

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

При заданной допустимой потере напряжения, используя формулу (2-31), можно определить необходимое сечение проводов линии

$$S = \frac{2Il}{\gamma \Delta U}. \quad (2-33)$$

Найденное по формуле (2-33) сечение должно быть проверено на допустимое нагревание (табл. 2-3).

Мощность потерь в линии определяется произведением потери напряжения и тока, т. е.

$$\Delta P = I \Delta U = I^2 r.$$

Коэффициент полезного действия линии

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta U}{U_1}$$

с увеличением нагрузки уменьшается.

При потерях напряжения 2—5% к. п. д. линии составляет 98—95%.

2-11. Первый закон Кирхгофа

Точка электрической цепи называется **узлом** или **точкой разветвления**, если в ней соединяются три или большее число проводов (рис. 2-6). *Сумма токов, направленных к узлу, равна сумме токов, направленных от него.* Это первый закон Кирхгофа.

Например, для узла А можно написать:

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5,$$

или, придав уравнению другой вид, получим:

$$I_1 + I_2 + I_3 + (-I_4) + (-I_5) = 0,$$

а в общем виде

$$\sum I = 0, \quad (2-34)$$

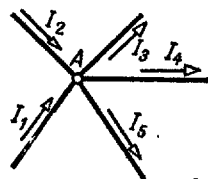


Рис. 2-6. Узел электрической цепи.

т. е. *алгебраическая сумма токов в узле равна нулю.* При этом токи, направленные к узлу, считаются положительными, а токи, направленные от узла, — отрицательными.

2-12. Последовательное соединение сопротивлений — приемников энергии

Последовательным соединением сопротивлений — приемников энергии называется соединение, при котором электроприемники соединены один за другим без разветвлений (рис. 2-7) и при наличии источника питания по ним проходит один и тот же ток.

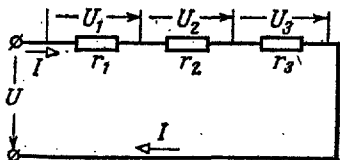


Рис. 2-7. Последовательное соединение сопротивлений.

По закону сохранения энергии энергия, затраченная на перемещение единичного заряда вдоль всей цепи, равна сумме энергий, затраченных на перемещение того же заряда на всех участках цепи, говоря другими словами: *напряжение на зажимах цепи равно сумме напряжений на всех участках ее:*

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \quad (2-35)$$

Разделив правую и левую часть последнего уравнения на ток цепи, получим:

$$U/I = U_1/I + U_2/I + U_3/I,$$

откуда

$$r = r_1 + r_2 + r_3. \quad (2-36)$$

Сопротивление r называется эквивалентным (общим) сопротивлением цепи, т. е. таким, замена которым всех сопротивлений цепи при неизменном напряжении не вызывает изменения силы тока.

Из написанного следует, что эквивалентное сопротивление ряда последовательно соединенных сопротивлений равно сумме этих сопротивлений. Примером последовательного соединения может служить цепь, рассмотренная в § 2-10, состоящая из проводов и приемника энергии (рис. 2-5).

Пример 2-8. В сеть напряжением 120 В включены последовательно соединенные обмотка электродвигателя с сопротивлением $r_1 = 24$ Ом и реостат с сопротивлением r_2 , которое можно изменять от 0 до 96 Ом. Определить, в каких пределах можно регулировать силу тока в цепи.

Решение.

Эквивалентное сопротивление цепи $r = r_1 + r_2$. При $r_2' = 0$ сила тока в цепи

$$I' = U/(r_1 + r_2') = 120/(24 + 0) = 5 \text{ А.}$$

При $r_2'' = 96$ Ом сила тока в цепи

$$I'' = U/(r_1 + r_2'') = 120/(24 + 96) = 1 \text{ А.}$$

2-13. Параллельное соединение сопротивлений — приемников энергии

Параллельным соединением сопротивлений — приемников энергии называется соединение, при котором один зажим каждого из приемников

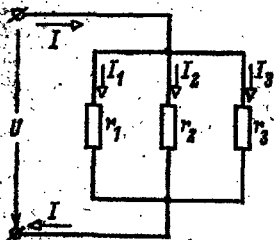


Рис. 2-8. Параллельное соединение сопротивлений.

присоединен к одной точке электрической цепи (рис. 2-8), а другой зажим каждого из тех же приемников присоединен к другой точке цепи. Таким образом, между двумя узлами приемники образуют параллельные ветви.

Напряжение на приемниках одинаково и равно напряжению между узлами

$$U = U_1 = U_2 = U_3. \quad (2-37)$$

Токи в приемниках определяются по закону Ома:

$$I_1 = \frac{U_1}{r_1} = U g_1; \quad I_2 = \frac{U_2}{r_2} = U g_2; \quad I_3 = \frac{U_3}{r_3} = U g_3. \quad (2-38)$$

откуда следует, что

$$I_1 : I_2 : I_3 = \frac{1}{r_1} : \frac{1}{r_2} : \frac{1}{r_3} = g_1 : g_2 : g_3, \quad (2-39)$$

т. е. токи в ветвях распределяются обратно пропорционально сопротивлениям ветвей или прямо пропорционально их проводимостям.

Разветвление из нескольких сопротивлений можно заменить эквивалентным или общим сопротивлением r , величина которого определяется равенством тока в эквивалентном сопротивлении I и в разветвлении ΣI при одном и том же направлении на зажимах. Таким образом, эквивалентное сопротивление

$$r = \frac{U}{I} = \frac{U}{I_1 + I_2 + I_3},$$

а эквивалентная проводимость

$$\frac{1}{r} = \frac{I_1 + I_2 + I_3}{U} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} = g_1 + g_2 + g_3 = g. \quad (2-40)$$

Из полученной формулы следует, что эквивалентная или общая проводимость параллельной цепи (разветвления) равна сумме проводимостей всех параллельных ветвей.

Преобразуя формулу (2-40), можно написать выражение эквивалентного сопротивления разветвленной цепи. Например, для трех приемников

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} = \frac{r_1 r_2 + r_1 r_3 + r_2 r_3}{r_1 r_2 r_3},$$

откуда

$$r = \frac{r_1 r_2 r_3}{r_1 r_2 + r_1 r_3 + r_2 r_3}. \quad (2-41)$$

При равенстве сопротивлений ветвей

$$r = \frac{r_1^3}{3r_1^2} = \frac{r_1}{3}.$$

В общем случае при n ветвях с одинаковыми сопротивлениями r_1 эквивалентное сопротивление разветвления

$$r = \frac{r_1}{n}. \quad (2-42)$$

Эквивалентное сопротивление двух параллельных ветвей согласно (2-40)

$$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}. \quad (2-43)$$

Приемники электрической энергии — электродвигатели, лампы накаливания, нагревательные приборы — предназначены для работы при постоянном номинальном напряжении, поэтому они соединяются параллельно друг другу.

Пример 2-9. К сети напряжением 220 В подключены: электродвигатель мощностью 5,5 кВт и 11 ламп накаливания мощностью по 100 Вт. Определить силу тока в подводящих проводах.

Решение.

Сила тока двигателя

$$I_1 = \frac{P_1}{U} = \frac{5500}{220} = 25 \text{ А.}$$

Сила тока в цепи ламп накаливания,

$$I_2 = \frac{P_2}{U} = \frac{100 \cdot 11}{220} = 5 \text{ А.}$$

Сила тока в подводящих проводах

$$I = I_1 + I_2 = 25 + 5 = 30 \text{ А.}$$

Пример 2-10. Определить эквивалентное сопротивление 10 параллельно включенных ламп накаливания, если номинальная мощность лампы 200 Вт, а номинальное напряжение 220 В.

Решение.

Сопротивление одной лампы

$$r_{\text{л}} = U_{\text{л}}^2 / P_{\text{л}} = 220^2 / 200 = 242 \text{ Ом.}$$

Эквивалентное сопротивление 10 ламп

$$r = r_{\text{л}} / n = 242 / 10 = 24,2 \text{ Ом.}$$

2-14. Смешанное соединение сопротивлений

Смешанным соединением называется последовательно-параллельное соединение сопротивлений или участков цепи.

Наиболее типичным примером смешанного соединения служит несколько параллельно соединенных приемников

энергии, соединенных последовательно с сопротивлением подводящих проводов (рис. 2-9). Расчет такой цепи при заданном напряжении на зажимах и известных сопротивлениях участков заключается в нахождении токов и напряжений на всех участках цепи.

Цепь, изображенная на

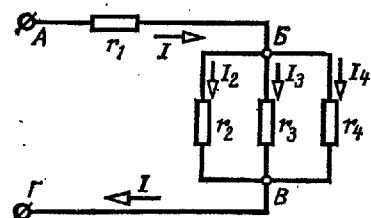


Рис. 2-9. Смешанное соединение сопротивлений.

рис. 2-9, состоит из двух последовательно соединенных участков: участка BB , состоящего из трех параллельных ветвей и участка AB с сопротивлением r_1 .

Проводимость разветвленного участка $БВ$

$$g_{БВ} = \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4},$$

а его сопротивление

$$r_{БВ} = \frac{1}{g_{БВ}}.$$

Эквивалентное сопротивление всей цепи

$$r = r_{АБ} + r_{БВ} = r_1 + r_{БВ}.$$

По закону Ома ток в цепи

$$I = \frac{U}{r} = \frac{U}{r_1 + r_{БВ}}.$$

Напряжения на участках $АБ$ и $БВ$:

$$U_{АБ} = U_1 = Ir_1 \quad \text{и} \quad U_{БВ} = Ir_{БВ}.$$

Токи в параллельных ветвях

$$I_2 = U_{БВ}/r_2; \quad I_3 = U_{БВ}/r_3; \quad I_4 = U_{БВ}/r_4.$$

Пример 2-11. Определить токи и напряжения всех участков цепи (рис. 2-9), если известны: $U = 240$ В; $r_1 = 2,12$ Ом, $r_2 = 20$ Ом, $r_3 = 10$ Ом, $r_4 = 50$ Ом.

Решение.

Проводимость разветвленного участка цепи $БВ$

$$g_{БВ} = \frac{1}{r_{БВ}} = \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} = \frac{1}{20} + \frac{1}{10} + \frac{1}{50} = 0,17 \text{ См.}$$

Сопротивление разветвленного участка

$$r_{БВ} = \frac{1}{g_{БВ}} = \frac{1}{0,17} = 5,88 \text{ Ом.}$$

Эквивалентное сопротивление всей цепи

$$r = r_1 + r_{БВ} = 2,12 + 5,88 = 8 \text{ Ом.}$$

Сила тока цепи

$$I = \frac{U}{r} = \frac{240}{8} = 30 \text{ А.}$$

Напряжение на первом сопротивлении

$$U_1 = Ir_1 = 30 \cdot 2,12 = 63,6 \text{ В.}$$

Напряжение на разветвленном участке цепи

$$U_{БВ} = Ir_{БВ} = 30 \cdot 5,88 = 176,4 \text{ В.}$$

Токи в разветвленных участках цепи

$$I_2 = \frac{U_{БВ}}{r_2} = \frac{176,4}{20} = 8,82 \text{ А}; \quad I_3 = \frac{U_{БВ}}{r_3} = \frac{176,4}{10} = 17,64 \text{ А};$$

$$I_4 = \frac{U_{БВ}}{r_4} = \frac{176,4}{50} = 3,53 \text{ А}.$$

2-15. Два режима работы источника питания

На рис. 2-10 показана цепь с двумя источниками питания и их внутренними сопротивлениями r_{01} и r_{02} . Ток в этой цепи можно определить по методу наложения, как алгебраическую сумму токов, созданных отдельными источниками. Допустим сначала, что э. д. с. первого источника $E_1 \neq 0$, а второго $E_2 = 0$, затем наоборот, $E_1 = 0$, а $E_2 \neq 0$.

В первом случае ток в цепи, совпадающий по направлению с э. д. с. E_1 , может быть выражен через

$$I_1 = \frac{E_1}{r_{01} + r_{02} + r}.$$

Во втором случае ток, совпадающий по направлению с э. д. с. E_2 ,

$$I_2 = \frac{E_2}{r_{01} + r_{02} + r}.$$

Рис. 2-10. Цепь с двумя источниками.

При одновременном действии э. д. с., т. е. при $E_1 \neq 0$ и $E_2 \neq 0$, ток в цепи найдем сложением токов I_1 и I_2 (метод наложения), т. е.

$$I = I_1 + I_2 = \frac{E_1 + E_2}{r_{01} + r_{02} + r}. \quad (2-44)$$

При одинаковом внутри контура направлении э. д. с. E_1 и E_2 токи I_1 и I_2 также направлены одинаково.

При встречном (как показано на рис. 2-10) направлении э. д. с. E_1 и E_2 ток в цепи равен разности токов:

$$I = I_1 - I_2 = \frac{E_1 - E_2}{r_{01} + r_{02} + r}, \quad (2-45)$$

т. е. он возникает только при $E_1 \neq E_2$, а направление тока совпадает с направлением большей э. д. с. Допустим, что

$E_1 > E_2$, тогда направление тока I совпадает с направлением E_1 и будет противоположно направлению E_2 . Электродвижущая сила E_2 , направленная встречно току, называется встречной или противо-э. д. с.

В сопротивлении r (участок $БВ$, рис. 2-10) электрическая энергия преобразуется в тепловую. Мощность на этом участке

$$P_{БВ} = I^2 r,$$

а падение напряжения на этом участке

$$U_{БВ} = P_{БВ}/I = Ir.$$

На участке $ВГ$, кроме тепловой мощности $I^2 r_{02}$, развивается еще мощность $E_2 I$, которая преобразуется в химическую или механическую в зависимости от устройства источника (аккумулятор или электрическая машина), так как электрические силы совершают работу по преодолению действия встречной э. д. с. Таким образом, источник с противо-э. д. с. E_2 работает в режиме потребителя.

Развиваемая на участке $ВГ$ мощность

$$P_{ВГ} = E_2 I + I^2 r_{02},$$

а напряжение на нем

$$U_{ВГ} = P_{ВГ}/I = E_2 + Ir_{02}. \quad (2-46a)$$

Следовательно, напряжение на зажимах источника, работающего в режиме потребителя, равно сумме э. д. с. и внутреннего падения напряжения.

На участке $БА$ э. д. с. E_1 совпадает по направлению с током I , так что источник с э. д. с. (аккумулятор или электрическая машина) работает в режиме генератора. Поэтому э. д. с. его равна сумме напряжения на зажимах и внутреннего падения напряжения (2-8)

$$E_1 = U_{БА} + U_0 = U_{БА} + Ir_{01},$$

а напряжение на зажимах генератора

$$U_{БА} = E_1 - Ir_{01}. \quad (2-46b)$$

Из написанного следует, что напряжение на зажимах источника, работающего в режиме генератора (т. е. отдающего электроэнергию), равно разности э. д. с. и внутреннего падения напряжения.

Развиваемая источником, работающим в генераторном режиме, мощность (2-25)

$$E_1 I = U_{БА} I + U_0 I = U_{БА} I + I^2 r_{01}.$$

Источник питания может работать как в режиме генератора, так и в режиме потребителя электрической энергии. В первом случае его напряжение меньше э. д. с. ($U < E$), а направления тока и э. д. с. совпадают. Во втором случае его напряжение больше э. д. с. ($U > E$), а ток и э. д. с. имеют противоположные направления.

2-16. Второй закон Кирхгофа

Ветвь электрической цепи — это участок ее, расположенный между двумя узлами. Замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям, называют контуром электрической цепи.

По второму закону Кирхгофа для любого замкнутого контура алгебраическая сумма всех э. д. с. E его равна алгебраической сумме всех падений напряжения $I r$ на сопротивлениях этого контура, т. е.

$$\sum E = \sum I r. \quad (2-47)$$

При составлении уравнений по этому закону э. д. с. и токи считаются положительными, если направления их совпадают с направлением произвольно выбранного обхода контура, в противном случае они считаются отрицательными и в уравнении (2-47) записываются со знаком минус.

Например, для контура АБВГА (рис. 2-10), обходя его по направлению движения часовой стрелки, можно написать:

$$E_1 + (-E_2) = I r_{01} + I r + I r_{02},$$

что согласуется со сказанным в § 2-15.

2-17. Расчет сложных цепей

Сложной электрической цепью называют цепь с несколькими замкнутыми контурами, с любым размещением в ней источников питания и потребителей, которую нельзя свести к сочетанию последовательных и параллельных соединений.

Основными законами для расчета цепей наряду с законом Ома являются два закона Кирхгофа, пользуясь которыми, можно найти распределение токов и напряжений на всех участках любой сложной цепи.

В § 2-15 мы ознакомились с одним методом расчета сложных цепей, методом наложения. Сущность этого метода

заключается в том, что ток в какой-либо ветви является алгебраической суммой токов, создаваемых в ней всеми поочередно действующими э. д. с. цепи.

Рассмотрим расчет сложной цепи методом узловых и контурных уравнений или уравнений по законам Кирхгофа.

Для нахождения токов во всех ветвях цепи необходимо знать сопротивления ветвей, а также величины и направления всех э. д. с.

Перед составлением уравнений по законам Кирхгофа следует произвольно задаться направлениями токов в ветвях, показав их на схеме стрелками. Если выбранное направление тока в какой-либо ветви противоположно действительному, то после решения уравнений этот ток получается со знаком минус.

Число необходимых уравнений равно числу неизвестных токов; число уравнений, составляемых по первому закону Кирхгофа, должно быть на единицу меньше числа узлов цепи, остальные уравнения составляются по второму закону Кирхгофа. При составлении уравнений по второму закону Кирхгофа следует выбирать наиболее простые контуры, причем каждый из них должен содержать хотя бы одну ветвь, не входившую в ранее составленные уравнения.

Расчет сложной цепи с применением двух уравнений Кирхгофа рассмотрим на примере.

Пример 2-12. Вычислить токи во всех ветвях цепи рис. 2-11, если э. д. с. источников $E_1 = 246$ В; $E_2 = 230$ В, а сопротивления ветвей $r_1 = 0,3$ Ом; $r_2 = 1$ Ом; $r_3 = 24$ Ом.

Внутренними сопротивлениями источников пренебречь.

Выбранные произвольно направления токов в ветвях показаны на рис. 2-11.

Решение.

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

При двух узлах цепи необходимо одно узловое уравнение. Напишем его для точки В:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0. \quad (2-48)$$

Второе уравнение напишем, обходя по направлению движения часовой стрелки контур АБВЖЗА,

$$E_1 = I_1 r_1 + I_3 r_3. \quad (2-49)$$

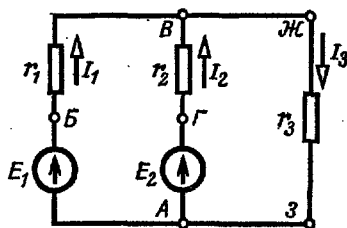


Рис. 2-11. Сложная электрическая цепь с двумя источниками питания.

Третье уравнение напишем, обходя по направлению движения часовой стрелки контур АГВЖЗА,

$$E_2 = I_2 r_2 + I_3 r_3. \quad (2-50)$$

Заменив в уравнениях (2-49) и (2-50) буквенные обозначения числовыми значениями, получим:

$$246 = 0,3 I_1 + 24 I_3; \quad (2-51)$$

$$230 = 1 I_2 + 24 I_3. \quad (2-52)$$

Заменив в последнем уравнении ток I_2 его выражением из уравнения (2-48), получим:

$$230 = 1 I_3 - 1 I_1 + 24 I_3 = -I_1 + 25 I_3. \quad (2-52a)$$

Умножив уравнение (2-52a) на 0,3 и сложив с уравнением (2-51), получим:

$$\begin{array}{r} 69 = -0,3 I_1 + 7,5 I_3 \\ 246 = 0,3 I_1 + 24 I_3 \\ \hline 315 = 31,5 I_3 \end{array} \quad (2-53)$$

откуда определяется ток в третьей ветви:

$$I_3 = \frac{31,5}{3,15} = 10 \text{ А.}$$

Напряжение на концах третьей ветви

$$U_{ЖЗ} = I_3 r_3 = 10 \cdot 24 = 240 \text{ В.}$$

Токи в первой и второй ветвях:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{E_1 - U_{ЖЗ}}{r_1} = \frac{246 - 240}{0,3} = 20 \text{ А;} \\ I_2 &= \frac{E_2 - U_{ЖЗ}}{r_2} = \frac{230 - 240}{1} = -10 \text{ А.} \end{aligned}$$

Полученное отрицательное значение тока I_2 указывает на то, что в действительности этот ток направлен противоположно указанному на схеме (рис. 2-11). Таким образом, источник E_1 работает в режиме генератора, а источник E_2 — в режиме двигателя.

2-18. Химические источники питания

а) Гальванические (первичные) элементы

Между электродом и электролитом, в который он погружен, всегда возникает некоторая разность потенциалов, зависящая от материала электрода и состава электролита.

Появление *электродного потенциала* объясняется тем, что вещество электрода под действием химических сил растворяется в электролите (например, цинк в растворе серной кислоты) и положительные ионы его переходят в элек-

тролит. Преобладание отрицательных зарядов на электроде и положительных в прилегающем к нему пограничном слое электролита вызывает появление двойного электрического слоя, а следовательно, и электрического поля на границе электрода. Электрические силы этого поля противодействуют переходу положительных ионов с электрода в раствор, уравнивая химические силы растворения электрода. Таким образом, возникает электродный потенциал.

Помещая в электролит два электрода из разных металлов, получим между ними также разность потенциалов (э. д. с.).

Следовательно, устройство, состоящее из двух разнородных электродов, помещенных в электролит, является источником э. д. с. — *гальваническим, или первичным элементом, в котором происходит необратимый процесс преобразования химической энергии в электрическую.*

Из многих типов элементов в качестве примера рассмотрим элемент Вольта (рис. 2-12). Он состоит из погруженных в водный раствор серной кислоты (H_2SO_4), цинкового (Zn) и медного (Cu) электродов. Первый имеет отрицательный заряд (катод), второй — положительный (анод). Электродвижущая сила элемента около 1,1 В.

При нагрузке элемента, т. е. при прохождении по нему тока, отрицательные ионы SO_4 и положительные ионы цинка Zn сближаются и, соединяясь, образуют молекулы цинкового купороса $ZnSO_4$. Одновременно положительные ионы водорода отнимают у анода электроны и превращаются в нейтральные атомы водорода. Атомы водорода, покрывая тонким слоем анод, вызывают увеличение внутреннего сопротивления элемента и уменьшение его э. д. с. Это явление называется *поляризацией*. Водородный слой у анода устраняют, применяя *деполяризаторы* — вещества, легко отдающие кислород (например, перекись марганца), который, соединяясь с водородом, образует воду.

Большое распространение получили сухие и наливные марганцево-цинковые элементы. По конструкции марганцево-цинковые элементы бывают стаканчиковые и галетные.

В элементе стаканчиковой конструкции цинковый электрод имеет форму стакана (рис. 2-13), внутри которого рас-

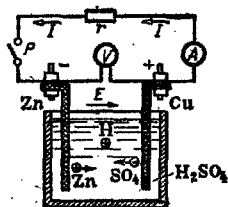


Рис. 2-12. Элемент Вольта и схема его включения.

положен положительный электрод — угольный стержень. Угольный электрод окружен деполяризатором из дву-

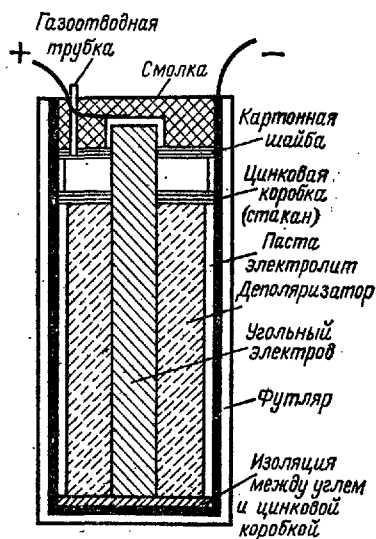


Рис. 2-13. Марганцево-цинковый элемент (МЦЭ) стаканчикového типа.

окси марганца, графита и сажи. Цинковый стакан заполняется электролитом — водным раствором хлористого аммония (нашатыря) с добавлением крахмала в качестве загустителя. Электродвижущая сила элемента $E = 1,5 \text{ В}$.

Номинальным разрядным током элемента называется наибольший длительный ток, допускаемый при его эксплуатации. Емкостью элемента называется количество электричества, выраженное в ампер-часах (А·ч), которое можно получить от элемента за весь период его работы. Как отдельные элементы, так и собранные из

них батареи широко применяются в радиотехнике, аппаратуре проводной связи, для карманных фонарей, слуховых аппаратов и т. д.

б) Аккумуляторы (вторичные элементы)

Гальванические элементы, у которых после их разряда возможен обратный процесс заряда, с преобразованием электрической энергии в химическую, называются аккумуляторами или вторичными элементами.

Наибольшее распространение получили аккумуляторы: свинцовые (кислотные) и кадмиево-никелевые, железо-никелевые и серебряно-цинковые (щелочные).

Свинцовый аккумулятор состоит из двух блоков — пластин (рис. 2-14), погруженных в электролит — 25—35%-ный водный раствор серной кислоты.

Положительные пластины из металлического свинца для увеличения поверхности соприкосновения с электролитом имеют ребристую поверхность или выполнены из свинцовых каркасов, заполненных активной массой (перекись свинца).

Отрицательные пластины представляют собой свинцовые каркасы, заполненные активной массой в виде губчатого свинца. Пластины после изготовления подвергаются электролитической обработке — формировке.

При разряде, т. е. в режиме, когда заряженный аккумулятор замкнут на внешнюю цепь, проходит разрядный ток, аккумулятор работает в режиме источника. При этом активная масса положительной пластины, состоящая из перекиси свинца PbO_2 , и активная масса отрицательной пластины — губчатый свинец Pb переходят в сернокислые соединения свинца $PbSO_4$ с выделением воды. Это приводит к уменьшению концентрации электролита, его проводимости и э. д. с. аккумулятора. Напряжение (э. д. с.) аккумулятора с 2,2 В сначала быстро падает до 2 В, а затем медленно до 1,8 В, после чего необходимо прекратить разряд во избежание сульфатации пластин — образования на них нерастворимого сернокислого свинца.

При заряде аккумулятора через него проходит ток, имеющий направление, противоположное разрядному току, для чего зажимы источника, заряжающего аккумулятор, соединяются с одноименными зажимами аккумулятора.

При заряде аккумулятора происходит обратная химическая реакция и на электродах восстанавливаются перекись свинца и губчатый свинец. Напряжение сначала быстро увеличивается до 2,2 В, затем медленно до 2,3 В и, наконец, до 2,6—2,7 В, при котором следует прекращать заряд. При этом напряжении наблюдается интенсивное выделение водорода, пузырьки которого, поднимаясь на поверхность электролита, создают впечатление его кипения.

Внутреннее сопротивление свинцовых аккумуляторов мало, поэтому токи короткого замыкания недопустимо велики.

Емкость аккумулятора, так же как и первичного элемента, определяется в ампер-часах за время нормального разряда.

Коэффициентом отдачи аккумулятора называется отношение отданного им при разряде количества

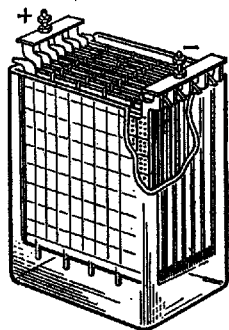


Рис. 2-14. Свинцовый аккумулятор.

электричества к полученному им при заряде, т. е.

$$\eta_0 = Q_p / Q_z. \quad (2-54)$$

Коэффициент отдачи свинцового аккумулятора 0,9—0,95.

Коэффициентом полезного действия аккумулятора называется отношение полученной от него при разряде энергии W_p к затраченной при заряде W_z , т. е.

$$\eta = W_p / W_z. \quad (2-55)$$

Коэффициент полезного действия свинцового аккумулятора 0,75—0,8.

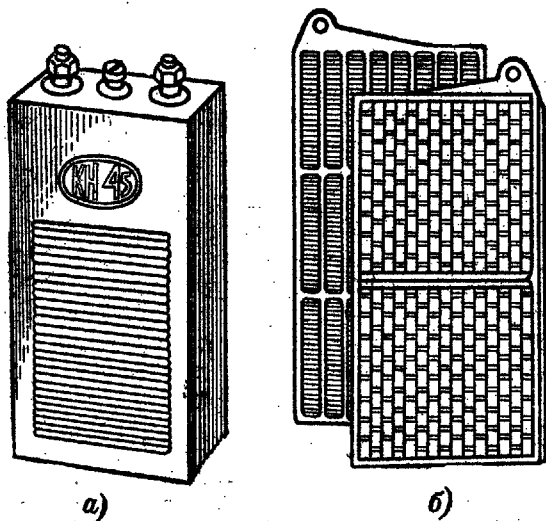


Рис. 2-15. Щелочный аккумулятор,

а — общий вид; б — пластины.

Во избежание сульфатации аккумулятора необходимо содержать его в заряженном состоянии и периодически проверять уровень и плотность электролита, напряжение под нагрузкой, а при необходимости дозаряжать его.

Щелочные аккумуляторы получили такое название по их электролиту щелочи — 21%-ный водный раствор едкого кали (KOH) или едкого натра (NaOH). Они состоят из двух блоков пластин, расположенных в стальном сосуде с электролитом (рис. 2-15). Пластины — это стальные рамки с вставленными в них стальными коробочками, заполненными активной массой. Активная масса отрицательных пластин кадмиево-никелевых элементов со-

стоит из губчатого кадмия, а железо-никелевых — из губчатого железа. Активная масса положительных пластин у обоих аккумуляторов состоит из гидрата окиси никеля $\text{Ni}(\text{OH})_2$.

При разряде гидрат окиси никеля переходит в гидрат закиси никеля, а губчатый кадмий (железо) — в гидрат его закиси. При заряде реакция идет в обратном направлении, и следовательно, происходит восстановление активной массы электродов. Концентрация электролита при разряде и заряде остается неизменной.

При разряде напряжение с 1,4 В сначала быстро уменьшается до 1,3 В, а затем медленно до 1,15 В, при котором необходимо прекращать разряд. При заряде напряжение с 1,15 В быстро увеличивается до 1,75 В, а затем после незначительного понижения медленно увеличивается до 1,85 В. Внутреннее сопротивление щелочных аккумуляторов больше, чем кислотных, поэтому они имеют более низкий к. п. д. $\eta = 0,5 \div 0,6$ и меньшую чувствительность к коротким замыканиям. Щелочные аккумуляторы имеют большую механическую прочность, большой срок службы и меньшую требовательность к уходу по сравнению с кислотными аккумуляторами.

Серебряно-цинковый аккумулятор состоит из двух блоков пластин, расположенных в пластмассовом баке с электролитом. Электроды аккумулятора представляют собой пористые пластины — положительная из окиси серебра (Ag_2O), а отрицательная из цинка (Zn). Электролит — водный раствор едкого кали (KOH) плотностью 1,4.

При разряде аккумулятора окись серебра переходит в металлическое серебро, а металлический цинк — в окись цинка. При заряде имеет место обратный процесс.

При заряде напряжение вначале почти неизменно (1,65 В), а затем быстро повышается примерно до 1,9 В и далее медленно до 2,1 В; при этом напряжении следует прекращать заряд. При разряде напряжение с 1,75 В медленно падает до 1,5 В и в конце разряда до 1,25—1 В; при этой величине разряд следует прекращать.

Из положительных свойств этих аккумуляторов необходимо отметить: 1) значительно большие емкость и мощность на единицу массы по сравнению с другими типами аккумуляторов; 2) стабильное напряжение при разряде (1,5 В) и возможность получения очень больших токов при кратковременных разрядах; 3) высокий к. п. д. $\eta = 0,85$.

2-19. Соединение химических источников питания

Если напряжение и ток, необходимые для питания потребителей, превышают соответствующие величины одного источника питания, то применяется соединение нескольких источников в батарею для совместной работы.

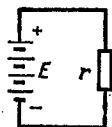


Рис. 2-16. Последовательное соединение источников питания.

Элементы, соединяемые в батарею, должны иметь одинаковые э. д. с. E_0 и одинаковые внутренние сопротивления r_0 .

Последовательное соединение элементов (рис. 2-16) применяется в том случае, если ток потребителя не превышает номинальный ток одного элемента, а напряжение потребителя U больше э. д. с. элемента (E_0). В этом случае число элементов n , соединенных последовательно, определяется отношением $n \geq U/E_0$. При одинаковом направлении э. д. с., для чего отрицательный зажим одного элемента должен соединяться с положительным зажимом следующего и т. д., э. д. с. батареи в n раз больше э. д. с. элемента:

$$E = nE_0; \quad (2-56)$$

внутреннее сопротивление батареи

$$r = nr_0. \quad (2-57)$$

Разрядный ток батареи равен разрядному току элемента.

Параллельное соединение элементов (рис. 2-17) применяется в том случае, если напряжение потребителя U равно напряжению элемента U_0 , а сила тока потребителя I значительно больше разрядного тока элемента I_p . В этом случае число элементов m , соединенных параллельно, определяется отношением $m \geq I/I_p$. При этом способе соединения положительные зажимы всех элементов соединяются в один узел, а отрицательные зажимы — в другой, таким образом, э. д. с. батарей E равна э. д. с. E_0 каждого элемента:

$$E = E_0; \quad (2-58)$$

внутреннее сопротивление батареи

$$r = r_0/m; \quad (2-59)$$

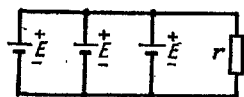


Рис. 2-17. Параллельное соединение источников питания.

разрядный ток батареи в m раз больше разрядного тока элемента:

$$I = I_p m. \quad (2-60)$$

Групповое соединение — это сочетание последовательного и параллельного соединений элементов (рис. 2-18). Оно применяется в тех случаях, когда напряжение и ток потребителя больше номинального напряжения и тока элемента. Число последовательно соединенных элементов n в группе и число параллельных групп m определяются по ранее приведенным формулам.

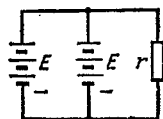


Рис. 2-18. Групповое соединение источников питания.

Пример 2-13. Определить параметры батарей аккумуляторов для питания аварийного освещения мощностью 2,9 кВт при напряжении $U = 120$ В; э. д. с. аккумулятора $E_0 = 2$ В, а разрядный ток его $I_p = 6$ А.

Решение.

Ток при аварийном освещении

$$I \doteq P/U = 2900/120 \approx 24 \text{ А.}$$

Число элементов, соединенных последовательно в одной ветви,

$$n \geq \frac{U}{E_0} = \frac{120}{2} = 60.$$

Число параллельных ветвей

$$m \geq I/I_p = 24/6 = 4.$$

Число элементов в батарее $nm = 60 \cdot 4 = 240$.

2-20. Нелинейные электрические цепи

Электрическая цепь, сопротивление которой не зависит ни от тока, ни от напряжения, называется **линейной**. Если сопротивление какого-либо участка — элемента электрической цепи зависит от тока или напряжения, то как элемент, так и цепь называются **нелинейными**. Примерами нелинейных элементов являются лампы накаливания, электронные и полупроводниковые приборы. Сопротивление нелинейной цепи изменяется, поэтому ток в ней не пропорционален напряжению на ее зажимах, т. е. закон Ома неприменим для ее расчета. Для расчета нелинейных цепей пользуются обычно графическими методами.

Зависимость силы тока в цепи от напряжения на ее зажимах $I = f(U)$ называется **вольт-амперной характеристикой**. Для линейного элемента вольт-

амперная характеристика представляет собой прямую Oa (рис. 2-19), проходящую через начало координат. Для нелинейного элемента она не прямолинейна, например, кривые Ob и $Oв$ — вольт-амперные характеристики для ламп с угольной и металлической нитями.

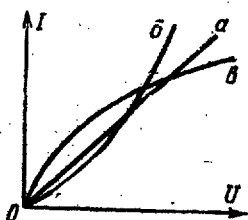


Рис. 2-19. Вольт-амперные характеристики.

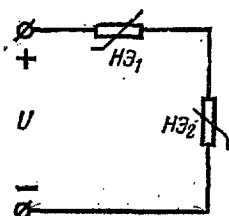


Рис. 2-20. Неразветвленная цепь с двумя нелинейными сопротивлениями.

Для расчета неразветвленной цепи с двумя нелинейными элементами (рис. 2-20), выбрав масштабы для тока и напряжения, построим в одних осях координат (рис. 2-21) вольт-амперные характеристики двух элементов цепи $I_1 = f_1(U_1)$ для $HЭ_1$ и $I_2 = f_2(U_2)$ для $HЭ_2$.

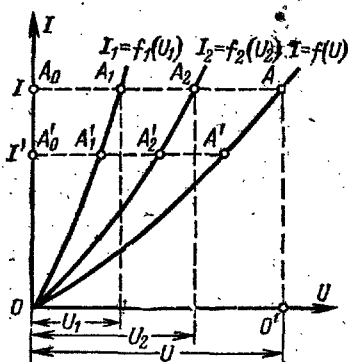


Рис. 2-21. Вольт-амперные характеристики неразветвленной цепи.

Складывая напряжения U_1 и U_2 , соответствующие одному и тому же значению тока, получим напряжение U на зажимах цепи, т. е. точки вольт-амперной характеристики цепи $I = f(U)$ (рис. 2-21). Например, точка A' вольт-амперной характеристики цепи для произвольного значения тока I' получена сложением абсцисс A_0 , A_1 и A_0 , A_2 .

При определении тока в цепи по заданному напряжению U его откладывают по оси абсцисс (отрезок OO'). Перпендикуляр $O'A$, восстановленный из точки O' до пересечения с вольт-амперной характеристикой цепи $I = f(U)$, выражает ток цепи I . Отрезки прямой A_0A_1 и A_0A_2 , проведенной через точку A параллельно оси абсцисс, определяют напряжения U_1 и U_2 на нелинейных участках цепи.

Расчет цепи с параллельно соединенными нелинейными элементами (рис. 2-22) при заданном напряжении на зажимах разветвления U_c заключается в нахождении токов в ветвях по их вольт-амперным характеристикам (рис. 2-23). Напряжение на ветвях одинаково, поэтому, отложив его по оси абсцисс (отрезок OO'), найдем токи I_1 и I_2 (отрезки $O'A_1$ и $O'A_2$). Общий ток цепи равен сумме токов в ветвях $I = I_1 + I_2$.

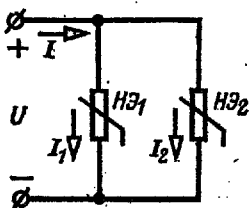


Рис. 2-22. Параллельное соединение двух нелинейных элементов.

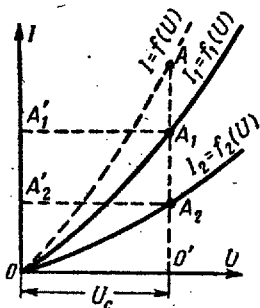


Рис. 2-23. Вольт-амперные характеристики (параллельная цепь).

Если необходимо найти токи в ветвях по заданному общему току I , то строят общую вольт-амперную характеристику $I = f(U)$, складывая ординаты вольт-амперных характеристик ветвей, соответствующие одним и тем же значениям напряжений (рис. 2-23).

При заданном токе I (точка A на общей характеристике) находим напряжение $U_c = U_1 = U_2$ (точка A) и точки I_1 и I_2 (точки A_1 и A_2).

Пример 2-14. Определить ток и напряжения на двух нелинейных элементах, соединенных последовательно при напряжении сети $U_c = 120$ В.

Решение.

Вольт-амперные характеристики строятся по данным табл. 2-4.

Построив характеристики участков, находя и складывая абсциссы для одних и тех же значений токов: 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 А обоих участков и откладывая их, получим точки вольт-амперной характеристики цепи (рис. 2-24).

По этой характеристике для напряжения $U_c = 120$ В находим ток в цепи $I = 0,4$ А. Этому значению тока соответствуют напряжения: на первом участке $U_1 = 40$ В и на втором $U_2 = 80$ В.

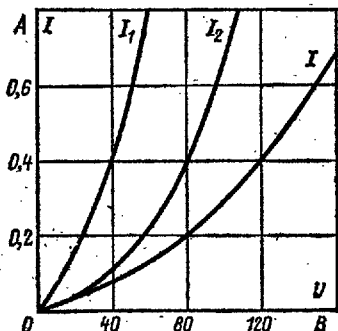


Рис. 2-24. К примеру 2-14.

Таблица 2-4

U	V	0	20	40	60	80	100
I_1	A	0	0,16	0,4	0,8	—	—
I_2	A	0	0,04	0,12	0,22	0,4	0,65

2-21. Лабораторная работа. Потеря напряжения в линии

При подготовке к работе проработать § 2-10.

П л а н р а б о т ы

1. Записать технические данные приборов.
2. Собрать схему (рис. 2-25) из медных проводов двухпроводной линии и показать ее руководителю работ.

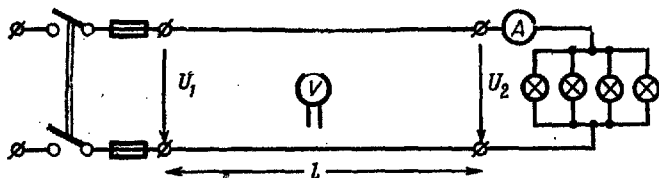


Рис. 2-25. К лабораторной работе «Потеря напряжения в линии».

3. При четырех различных нагрузках записать показания приборов.
4. Определить потерю напряжения $\Delta U'$ в линии по показаниям вольтметра.
5. Определить потерю напряжения $\Delta U''$ расчетом, применяя закон Ома.
6. Определить расчетом для каждой из нагрузок мощность потерь ΔP в линии и ее к. п. д. η .
7. В том же порядке повторить измерения и расчеты для линии из стальных проводов.
8. Наблюдения и расчеты записать в табл. 2-5.

Таблица 2-5

№ п/п.	Материал провода линии	U_1	U_2	I	l	S	γ	$\Delta U'$	$\Delta U''$	ΔP	η
		В	В	А	м	мм ²	м/Ом·мм ²	В	В	Вт	%

9. Дать заключение о проделанной работе.

Электромагнетизм

3-1. Магнитное поле тока. Магнитная индукция. Магнитный поток

Магнитная стрелка, внесенная в пространство, окружающее проводник с током, испытывает действие механических сил, под влиянием которых она занимает определенное положение. Это указывает на то, что проводник с током окружен магнитным полем, которое представляет собой одну из сторон электромагнитного поля, выявляемую по силовому действию на проводник с током или на движущиеся заряженные тела и элементарные частицы.

Магнитное поле возникает во всех случаях движения электрически заряженных частиц и тел. Магнитное поле постоянных магнитов, в том числе и магнитной стрелки, является следствием молекулярных токов, образуемых движением электронов по атомным орбитам и вращением их вокруг своих осей.

Магнитное поле и электрический ток неразрывно связаны друг с другом.

Направление, указываемое северным концом магнитной стрелки, установившейся под действием сил поля, принимается за направление магнитного поля.

Прямолинейный провод с током I , расположенный в магнитном поле перпендикулярно его направлению (рис. 3-1), испытывает действие электромагнитной силы F . Эта сила пропорциональна току I , длине той части провода l , которая расположена в данном магнитном поле (активной длине) и интенсивности магнитного поля, определяемой магнитной индукцией B :

$$F = IlB, \quad (3-1)$$

откуда магнитная индукция

$$B = \frac{F}{Il}. \quad (3-2)$$

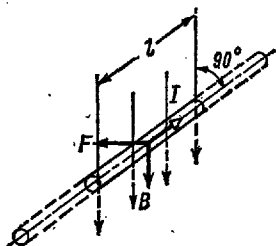


Рис. 3-1. Провод с током в магнитном поле.

Таким образом, магнитная индукция численно равна электромагнитной силе, действующей на провод длиной 1 м, расположенный перпендикулярно направлению поля, при токе в нем 1 А.

Единицей магнитной индукции служит тесла (Т)

$$[B] = \left[\frac{F}{Il} \right] = \frac{Н}{А \cdot м} = \frac{Дж/м}{А \cdot м} = \frac{В \cdot Кл}{А \cdot м^2} = \frac{В \cdot А \cdot с}{А \cdot м^2} = \frac{В \cdot с}{м^2} = \frac{Вб}{м^2} = Т.$$

Единица вольт-секунда называется вебер (Вб), а вебер, деленный на квадратный метр — тесла (Т).

Магнитная индукция иногда измеряется в гауссах (Гс) — единице, не принадлежащей к системе СИ, при этом

$$1 \text{ Гс} = 10^{-4} \text{ Т}, \text{ или } 1 \text{ Т} = 10^4 \text{ Гс}.$$

Магнитная индукция является векторной величиной, направление вектора ее в каждой точке совпадает с направлением магнитной стрелки.

Магнитное поле, во всех точках которого векторы магнитной индукции равны между собой, называется однородным. Такое поле получается, например, между двумя плоскими параллельно расположенными полюсами магнита или электромагнита.

Графически магнитное поле изображается линиями магнитной индукции или магнитными линиями. Они проводятся так, чтобы направление касательной в каждой точке линии совпадало с вектором магнитной индукции, а следовательно, и с направлением поля. Магнитные линии всегда являются замкнутыми. На рис. 3-2 показаны магнитные линии прямолинейного проводника с током, а на рис. 3-3 — магнитные линии кольцевого тока.

Направление магнитного поля зависит от направления тока. По правилу буравчика: при совпадении поступательного движения буравчика с направлением тока направление вращения его рукоятки указывает направление магнитных линий. Или иначе, при совпадении направления вращения рукоятки буравчика с направлением тока в контуре (рис. 3-3) поступательное движение буравчика указывает направление магнитных линий, пронизывающих поверхность, ограниченную контуром.

Если через каждую единичную площадку (например 1 м² или 1 см²), перпендикулярную направлению поля, провести число линий, равное или пропорциональное величине магнитной индукции в данном месте поля, то плот-

ность магнитных линий можно использовать для оценки величины магнитной индукции.

Произведение магнитной индукции B , однородного поля и величины площади S , перпендикулярной вектору этой индукции, называется магнитным потоком:

$$\Phi = BS. \quad (3-3)$$

Так как величина магнитной индукции оценивается плотностью магнитных линий, то, естественно, оценка магнитного потока, пронизывающего площадь S , производится числом магнитных линий, проходящих через указанную площадь.

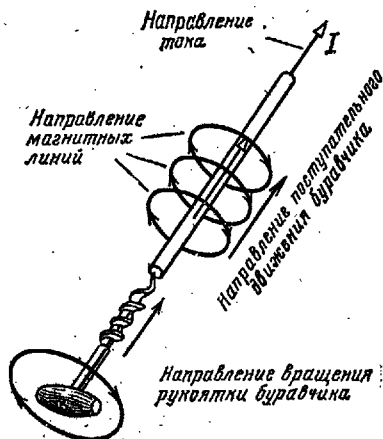


Рис. 3-2. Правило буравчика.

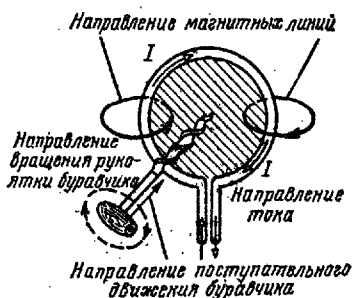


Рис. 3-3. Правило буравчика для кольцевого тока.

В системе СИ магнитный поток измеряется в теслах, умноженных на квадратный метр, или в веберах (Вб), так как

$$[\Phi] = T \cdot m^2 = \frac{Вб}{м^2} \cdot м^2 = Вб.$$

Иногда применяется не относящаяся к системе СИ более мелкая единица магнитного потока максвелл:

$$1 \text{ Мкс} = 1 \text{ Гс} \cdot \text{см}^2 = 10^{-8} \text{ Вб}.$$

3-2. Электромагнитная сила

а) Прямолинейный провод в магнитном поле

Силовое воздействие магнитного поля на проводники с током широко используется в электродвигателях и некоторых электромагнитных механизмах.

В предыдущем параграфе установлено, что электромагнитная сила, действующая на проводник с током, расположенный в магнитном поле перпендикулярно его направлению, определяется по формуле (3-1).

Если проводник расположен не перпендикулярно полю, а под некоторым углом α к направлению поля, то электромагнитная сила будет зависеть еще от синуса угла α , т. е.

$$F = BIl \sin \alpha. \quad (3-4)$$

Направление электромагнитной силы определяется по правилу левой руки: если ладонь левой руки (рис. 3-4) расположена так, что вектор магнитной индукции входит в нее, вытянутые четыре пальца совпадают с направлением

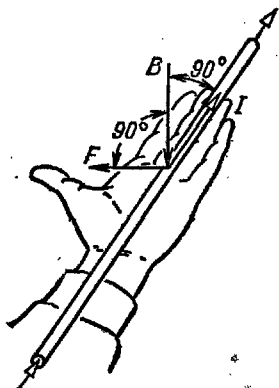


Рис. 3-4. Правило левой руки.

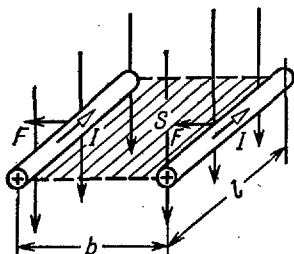


Рис. 3-5. Перемещение проводника в магнитном поле на расстояние b .

тока, то отогнутый под прямым углом большой палец левой руки указывает направление электромагнитной силы.

Прямолинейный провод длиной l с током I расположен в однородном магнитном поле в плоскости, перпендикулярной полю (рис. 3-5). Если этот провод под действием электромагнитной силы переместится параллельно самому себе в указанной плоскости на расстояние b , то он «пересечет» магнитный поток $\Phi = BS = Blb$. При этом электромагнитной силой будет совершена механическая работа

$$A = Fb = IBlb = I\Phi. \quad (3-5)$$

Таким образом, механическая работа, совершенная за счет энергии источника питания силами взаимодействия поля и тока при перемещении провода, равна произведению тока и магнитного потока, пересеченного проводом.

Пример 3-1. Провод с активной длиной 20 см и током 300 А расположен в однородном магнитном поле с индукцией 1,2 Т.

Определить электромагнитную силу, действующую на провод, если он расположен в плоскости, перпендикулярной полю.

Решение.

$$F = BIl = 1,2 \cdot 300 \cdot 0,2 = 720 \text{ Н.}$$

Пример 3-2. Определить работу при перемещении провода длиной 30 см на расстояние 20 см в плоскости, перпендикулярной полю, если поле однородно с индукцией 1,5 Т, а ток в проводе 200 А.

Решение.

Магнитный поток, пересеченный проводом,

$$\Phi = BS = 1,5 \cdot 0,3 \cdot 0,2 = 0,09 \text{ Вб.}$$

Работа, совершенная при перемещении провода,

$$A = \Phi I = 0,09 \cdot 200 = 18 \text{ Дж.}$$

б) Контур в магнитном поле

Стороны прямоугольной катушки — рамки с током (рис. 3-6), расположенные перпендикулярно плоскости рисунка, находятся в однородном поле. Электромагнитные силы F создают вращающий момент. Под действием этого

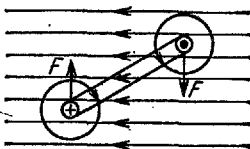


Рис. 3-6. Вращающий момент, действующий на контур с током в магнитном поле.

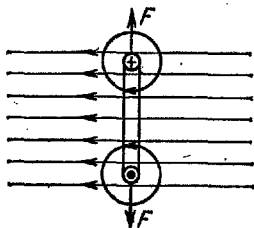


Рис. 3-7. Электромагнитные силы, действующие на контур с током.

момента рамка стремится занять положение, при котором эти силы взаимно уравниваются (рис. 3-7), при этом рамка будет пронизываться наибольшим магнитным потоком. Из сказанного следует, что контур с током, расположенный в магнитном поле, под действием электромагнитных сил стремится занять положение, в котором магнитный поток, пронизывающий контур, будет наибольшим.

в) Электрон, движущийся в магнитном поле

Электромагнитная сила, действующая на провод с током длиной l (рис. 3-1),

$$F = IBl.$$

Эту силу можно рассматривать как сумму сил, действующих на свободные электроны провода, направленное движение которых представляет собой ток.

Число свободных электронов в проводе длиной l обозначим N ; тогда сила, действующая на электрон,

$$F_0 = \frac{F}{N}.$$

Обозначив суммарный заряд свободных электронов $Q = Ne$ и среднюю скорость движения их $v = l/t$, получим

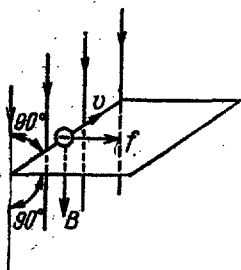


Рис. 3-8. Направление электромагнитной силы, действующей на движущий электрон.

выражение электромагнитной силы, действующей на электрон, движущийся перпендикулярно полю,

$$F_0 = \frac{F}{N} = \frac{Q}{t} Bl \frac{1}{N} = \frac{Ne}{t} Bl \frac{1}{N} = Bev. \quad (3-6)$$

Направление этой силы (рис. 3-8) определяется по правилу левой руки, но четыре вытянутые пальца левой руки должны быть направлены встречно движению электронов.

3-3. Взаимодействие параллельных проводов с токами

Вокруг каждого из двух параллельных проводов с токами I_1 и I_2 (рис. 3-9) возникает магнитное поле. Поэтому на первый провод, находящийся в магнитном поле тока I_2 , будет действовать электромагнитная сила F_1 , а на второй провод, находящийся в поле тока I_1 , — сила F_2 . Опыты показывают, что силы F_1 и F_2 всегда равны друг другу, т. е. $F_1 = F_2 = F$. Эти силы часто называют электродинамическими.

Пользуясь правилами буравчика и левой руки, легко установить, что провода с токами одного направления притягиваются, а провода с токами разных направлений отталкиваются друг от друга (рис. 3-9).

Если каждый из двух параллельно расположенных в вакууме проводов имеет длину l , значительно большую расстояния a между ними ($l \gg a$), то сила F , действующая на каждый из проводов, пропорциональна произведению токов,

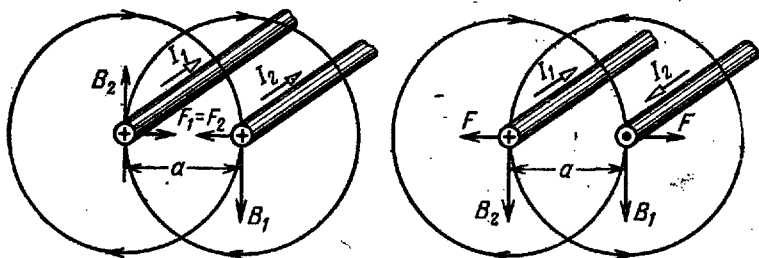


Рис. 3-9. Электромагнитные силы взаимодействия между проводами с током.

идущих по проводам, их длине и обратно пропорциональна расстоянию между ними

$$F = \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi a} l. \quad (3-7)$$

При равенстве токов в проводах $I_1 = I_2 = I$ сила, действующая на каждый из проводов,

$$F = \mu_0 \frac{I^2}{2\pi a} l. \quad (3-7a)$$

Коэффициент пропорциональности μ_0 , называемый магнитной постоянной, зависит от принятой системы единиц (3-9).

В соответствии с формулами (3-1) и (3-7) силы, действующие на провода с током, могут быть выражены:

$$F = B_1 I_2 l = B_2 I_1 l = \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi a} l,$$

а магнитные индукции на расстоянии a от проводов с токами согласно (3-2)

$$B_1 = \mu_0 \frac{I_1}{2\pi a} \quad \text{и} \quad B_2 = \mu_0 \frac{I_2}{2\pi a},$$

или в общем виде

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi a}. \quad (3-8a)$$

Таким образом, магнитная индукция во всех точках на расстоянии a от оси провода имеет одинаковое значение.

Из (3-8) магнитная постоянная

$$\mu_0 = B \frac{2\pi a}{I},$$

откуда определяется единица ее измерения

$$[\mu_0] = [B] \left[\frac{2\pi a}{I} \right] = \text{Т} \cdot \frac{\text{м}}{\text{А}} = \frac{\text{В} \cdot \text{с} \cdot \text{м}}{\text{м}^2 \cdot \text{А}} = \frac{\text{Ом} \cdot \text{с}}{\text{м}} = \frac{\text{Г}}{\text{м}}.$$

Единица ом-секунда (Ом·с) называется г е н р и (Г), поэтому единицей магнитной постоянной будет генри на метр (Г/м).

Магнитная постоянная в системе СИ имеет значение

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 125 \cdot 10^{-8} \text{ Г/м}. \quad (3-9)$$

3-4. Магнитная проницаемость

В § 3-3 рассмотрено электродинамическое взаимодействие между двумя параллельными проводами, расположенными в вакууме.

Если пространство между проводами будет заполнено каким-либо веществом, то силы взаимодействия между проводами с током увеличатся в μ раз и могут быть найдены по формуле

$$F = \mu_0 \mu \frac{I_1 I_2}{2\pi a} l \quad \text{или} \quad F = \mu_0 \mu \frac{I^2}{2\pi a} l. \quad (3-76)$$

Множитель μ , называемый магнитной проницаемостью материала, является отвлеченным числом.

Увеличение сил взаимодействия между проводами объясняется изменением интенсивности магнитного поля, которая зависит не только от тока, размеров и формы проводов с током, но и от свойства вещества, в котором создается поле.

Применяя (3-1) и (3-76) подобно предыдущему, можно получить выражение магнитной индукции на расстоянии a от провода с током, расположенного в среде с магнитной проницаемостью μ :

$$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2\pi a} = \mu_a \frac{I}{2\pi a}, \quad (3-86)$$

где μ_a — абсолютная магнитная проницаемость среды (материала).

Магнитная проницаемость материала μ показывает, во сколько раз абсолютная магнитная проницаемость данного

материала больше магнитной постоянной, т. е.

$$\mu = \mu_a / \mu_0 \quad \text{или} \quad \mu_a = \mu_0 \mu. \quad (3-10)$$

В различных средах, в зависимости от их магнитных свойств, магнитная индукция поля, созданного одним и тем же током, получается или большей, чем в вакууме ($\mu > 1$), или меньшей ($\mu < 1$).

Магнитная проницаемость воздуха и большинства веществ, за исключением ферромагнитных материалов, близка к единице ($\mu = 1$), поэтому для них $\mu_a \approx \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м, а формулу (3-8) можно записать в более удобном для расчета виде:

$$B = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{I}{2\pi a} = \frac{2I}{a} 10^{-7}. \quad (3-11)$$

Пример 3-3. Определить магнитную индукцию на расстоянии 10 см от оси провода с током 600 А.

Решение.

$$B = \mu_0 \frac{2I}{2\pi a} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{600}{2\pi \cdot 0,1} 10^{-7} = 12 \cdot 10^{-4} \text{ Т.}$$

Пример 3-4. Определить силу взаимодействия между проводами длиной 5 м при расстоянии между ними 10 см, находящимися в воздухе при токе короткого замыкания $I = I_1 = I_2 = 5000$ А.

Решение.

$$F = \mu_a \frac{I^2}{2\pi a} l = 4 \cdot 10^{-7} \frac{5000^2}{2 \cdot 0,1} 5 = 250 \text{ Н.}$$

3-5. Напряженность магнитного поля. Магнитное напряжение

Отношение магнитной индукции к абсолютной магнитной проницаемости называется **напряженностью магнитного поля** (H), следовательно,

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

Напряженность магнитного поля в системе СИ измеряется в амперах на метр (А/м):

$$[H] = \left[\frac{B}{\mu_a} \right] = \frac{В \cdot с}{м^2} = \frac{м}{Ом \cdot с} = \frac{А}{м}.$$

Иногда применяется единица напряженности поля — **эрстед** (Э), не принадлежащая к системе СИ:

$$1 \text{ Э} = 80 \text{ А/м} = 0,8 \text{ А/см.}$$

Напряженность магнитного поля, как и магнитная индукция, является векторной величиной, совпадающей по направлению с направлением поля в рассматриваемой точке.

Магнитная индукция (3-8) пропорциональна μ_a , а напряженность поля, равная B/μ_a (3-11) в однородной среде, не зависит от магнитной проницаемости, т. е. от свойств среды. Таким образом, напряженность поля позволяет рассчитать магнитное поле токов без учета среды.

Произведение напряженности магнитного поля и участка длины магнитной линии называется **магнитным напряжением**:

$$U_m = Hl. \quad (3-12)$$

Магнитное напряжение вдоль произвольного замкнутого контура называется **магнитодвижущей силой** — м. д. с. F_m (намагничивающей силой). Таким образом, м. д. с. определяется как сумма элементарных магнитных напряжений $\sum H \Delta l$ вдоль замкнутого контура магнитной цепи.

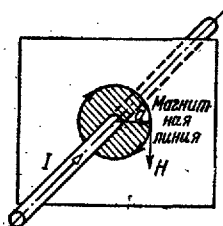
Единицей измерения магнитного напряжения и м. д. с. является ампер (А)

$$[U_m] = [Hl] = \frac{A}{m} \cdot m = A.$$

3-6. Закон полного тока

Полным током называется алгебраическая сумма токов, пронизывающих поверхность, ограниченную замкнутым контуром.

Разделив правую и левую части уравнений (3-8) на абсолютную магнитную проницаемость, получим напряженность магнитного поля на расстоянии a от оси провода с током (рис. 3-10):



$$H = \frac{B}{\mu_a} = \frac{I}{2\pi a}, \quad (3-13)$$

откуда

$$I = H2\pi a = Hl. \quad (3-14)$$

Рис. 3-10. Провод с током, проходящий через поверхность, перпендикулярную к оси провода.

Произведение напряженности поля H и длины магнитной линии $l = 2\pi a$, ограничивающей замкнутый контур, представляет собой м. д. с. F_m .

Поверхность, ограниченную магнитной линией, пронизывает один ток I и в данном случае алгебраическая сумма токов $\sum I = I$.

Таким образом, выражение (3-14) можно переписать в виде

$$\sum I = F_m, \quad (3-15)$$

т. е. намагничивающая сила вдоль контура равна полному току, проходящему сквозь поверхность, ограниченную этим контуром. Написанное соотношение называется законом полного тока, который рассмотрен на простейшем примере.

В общем случае напряженность поля на различных участках магнитной линии может иметь разные значения, тогда намагничивающая сила

$$F_m = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + \dots \quad (3-16)$$

3-7. Магнитное поле катушки с током

Для концентрации магнитного поля в определенной части пространства из провода изготавливают катушку, по которой пропускают ток.

Увеличение магнитной индукции поля достигается увеличением числа витков катушки и размещением ее на стальном сердечнике, молекулярные токи которого, создавая свое поле, увеличивают результирующее поле катушки.

Кольцевая катушка (рис. 3-11) имеет ω витков, равномерно распределенных вдоль немагнитного сердечника. Поверхность, ограниченная окружностью радиуса R , совпадающей с средней магнитной линией, пронизывается полным током $\Sigma I = I\omega$.

Вследствие симметрии напряженность поля H во всех точках, лежащих на средней магнитной линии, одинакова, поэтому м. д. с.

$$F_m = Hl = H2\pi R.$$

По закону полного тока

$$I\omega = Hl, \quad (3-17)$$

откуда напряженность магнитного поля на средней магнитной линии, совпадающей с осевой линией кольцевой катушки,

$$H = \frac{I\omega}{l}, \quad (3-18)$$

а магнитная индукция

$$B = \mu_a H = \mu_a \frac{I\omega}{l} = 125\mu \frac{I\omega}{l} 10^{-8}, \text{ Т.} \quad (3-19)$$

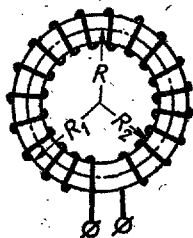


Рис. 3-11. Кольцевая катушка.

При $R_1 - R_2 \ll R_1$ магнитную индукцию на осевой линии с достаточной точностью можно считать равной среднему значению ее, и, следовательно, магнитный поток сквозь поперечное сечение катушки

$$\Phi = BS = \mu_a \frac{IwS}{l}. \quad (3-20)$$

Уравнению (3-20) можно придать форму закона Ома для магнитной цепи

$$\Phi = \frac{Iw}{l/(\mu_a S)} = \frac{F_m}{R_m}, \quad (3-21)$$

где Φ — магнитный поток;

F_m — м. д. с.;

$R_m = l/(\mu_a S)$ — сопротивление магнитной цепи (сердечника).

Уравнение (3-21) аналогично уравнению закона Ома для электрической цепи, т. е. магнитный поток равен отношению м. д. с. к магнитному сопротивлению цепи.

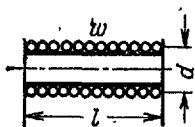


Рис. 3-12. Цилиндрическая катушка.

Цилиндрическую катушку (рис. 3-12) можно рассматривать как часть кольцевой катушки с достаточно большим радиусом и с обмоткой, расположенной только на части сердечника, длина которой равна длине катушки. Напря-

женность поля и магнитную индукцию на осевой линии в центре цилиндрической катушки определяют по формулам (3-18) и (3-19), которые в этом случае являются приближенными и применимыми только для катушек, у которых $l \gg d$ (рис. 3-12).

Пример 3-5. Цилиндрическая катушка с сердечником из неферромагнитного материала $\mu = 1$, с числом витков 2 000, имеет длину 30 см и диаметр 5 см. Определить магнитный поток катушки при токе в ней 5 А.

Решение.

Магнитный поток катушки

$$\Phi = 125\mu \frac{IwS}{l} 10^{-8} = 125 \cdot 1 \cdot \frac{5 \cdot 2000 \cdot 3,14 \cdot 0,025^2}{0,3} \cdot 10^{-8} = 8,1 \cdot 10^{-6} \text{ Вб.}$$

3-8. Ферромагнетики, их намагничивание и перемагничивание

Материалы, обладающие большой магнитной проницаемостью, называются *ферромагнетиками*. К ним относятся: сталь, железо, никель, кобальт, их сплавы и др.

Магнитные свойства веществ зависят от магнитных свойств элементарных носителей магнетизма — движущихся внутри атомов электронов, а также от совместного действия их групп.

Электроны в атомах, двигаясь по орбитам вокруг ядра атома, образуют элементарные токи или магнитные диполи, которые характеризуются *магнитным моментом диполя* m . Величина его равна произведению элементарного тока i и элементарной площадки S (рис. 3-13), ограниченной элементарным контуром $m = iS$. Вектор m направлен перпендикулярно к площадке S по правилу буравчика. *Магнитный момент тела* представляет собой геометрическую сумму магнитных моментов всех диполей.

Кроме рассмотренных орбитальных моментов электроны, вращаясь вокруг своих осей, создают еще так называемые *спиновые моменты*, которые играют важнейшую роль в намагничивании ферромагнетиков.

В ферромагнетиках образуются отдельные, самопроизвольно намагниченные области (10^{-2} — 10^{-6} см³), спиновые моменты которых ориентируются параллельно. Если ферромагнетик не находится во внешнем поле, то магнитные моменты отдельных областей направлены самым различным образом и суммарный магнитный момент тела равен нулю — ферромагнетик не намагничен. Внесение ферромагнетика во внешнее магнитное поле, например катушки с током, вызывает поворот магнитных моментов части областей в направлении внешнего поля и рост размеров тех областей, направления магнитных моментов которых близки к направлению внешнего поля. В результате ферромагнетик намагничивается.

Если при увеличении внешнего поля все области будут ориентированы в направлении внешнего поля и прекратится рост областей намагничивания, то наступит состояние предельной намагниченности ферромагнетика, называемое *магнитным насыщением*.

В магнитной цепи, образованной преимущественно ферромагнитными участками, можно получить большую магнитную индукцию при относительно малой м. д. с.

Профессор Московского университета А. Г. Столетов в 1872 г., помещая стальной сердечник в катушку с током

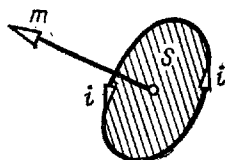


Рис. 3-13. Магнитный момент диполя.

и измеряя магнитную индукцию в нем (B) при различных значениях напряженности поля (H), впервые получил зависимость $B = f(H)$, которая изображается кривой начального намагничивания (рис. 3-14). Кривая состоит из трех участков: 1) прямолинейный участок Oa



А. Г. Столетов (1839—1896).

магнитная проницаемость ферромагнетика $\mu_a = B/H$ непостоянна и зависит от напряженности поля.

При работе в цепях переменного тока происходит периодическое перемагничивание ферромагнетика.

При увеличении намагничивающего тока, а следовательно, и напряженности поля H магнитная индукция достигает максималь-

показывает, что в начале магнитная индукция быстро растет почти пропорционально напряженности; 2) участок ab , называемый коленом кривой, на котором рост магнитной индукции замедляется; 3) участок, расположенный за коленом кривой, показывает, что здесь зависимость между B и H линейна, но нарастание магнитной индукции происходит медленно вследствие магнитного насыщения.

Нелинейная зависимость $B = f(H)$ показывает, что

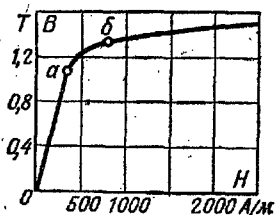


Рис. 3-14. Начальная кривая намагничивания стали.

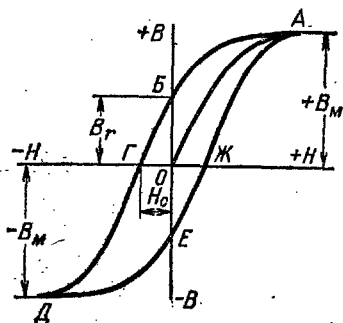


Рис. 3-15. Петля гистерезиса.

ного значения $+B_m$ (рис. 3-15). При уменьшении H магнитная индукция уменьшается, но при тех же значениях H магнитная индукция имеет несколько большие значе-

ния, чем при нарастании H (участок кривой AB). При напряженности поля $H = 0$ магнитная индукция называется остаточной B_r (отрезок OB рис. 3-15).

Из изложенного следует, что магнитная индукция зависит не только от напряженности поля, но и от предварительного магнитного состояния ферромагнетика. Рассмотренное явление запаздывания магнитной индукции называется магнитным гистерезисом. Оно вызывается как бы внутренним трением, возникающим при изменении ориентации магнитных моментов областей самопроизвольного намагничивания.

При изменении направления намагничивающего тока меняется и направление напряженности поля. Доведя ее до значения H_c , называемого коэрцитивной силой (отрезок OG), получим индукцию $B = 0$.

При дальнейшем увеличении H обратного направления магнитная индукция достигнет значения $-B_m$. Далее уменьшая H до нуля, получим уменьшение B до значения остаточной индукции (отрезок OE). Наконец, изменив еще раз направление H и увеличив ее снова, получим индукцию $+B_m$.

Таким образом, при циклическом перемагничивании ферромагнетика зависимость $B = f(H)$ графически можно представить замкнутой кривой — симметричной петлей гистерезиса $ABГДЕЖА$. Наибольшая из возможных петель для данного материала называется предельной петлей.

Построив для данного ферромагнетика несколько симметричных петель с разными B_m (рис. 3-16) и соединив вершины петель, получим основную кривую намагничивания, близкую к кривой начального намагничивания.

Перемагничивание стали вызывает нагрев, что связано с потерями энергии от гистерезиса. Площадь петли гистерезиса пропорциональна энергии, затраченной на один цикл перемагничивания.

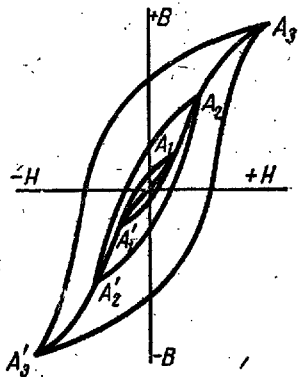


Рис. 3-16. Три петли гистерезиса и основная кривая намагничивания стали.

Мощность удельных потерь от гистерезиса, выраженная в ваттах на килограмм массы сердечника, зависит от сорта стали, магнитной индукции и

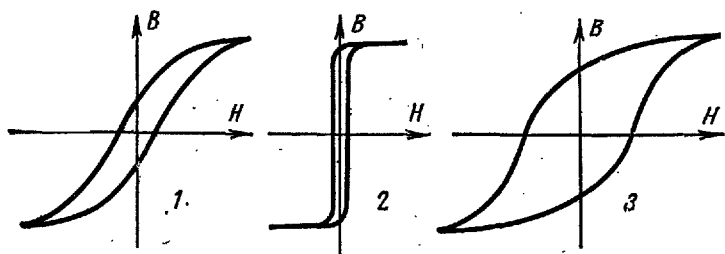


Рис. 3-17. Петли гистерезиса для различных материалов.

1 — магнитномягкий материал, электротехническая сталь; 2 — магнитномягкий материал, пермаллой; 3 — магнитотвердый материал.

числа циклов перемагничивания стали в секунду или, что то же, частоты переменного тока f в обмотке электромагнита.

Основная кривая намагничивания и петля гистерезиса характеризуют свойства магнитных материалов. Три петли, типичные для мягкой стали, пермаллоя и твердой стали даны на рис. 3-17.

3-9. Ферромагнитные материалы

а) Магнитномягкие материалы

Магнитномягкие материалы обладают высокой магнитной проницаемостью, малой коэрцитивной силой H_c (ниже 400 А/м) и малыми удельными потерями. К этой группе относятся: техническое железо, низкоуглеродистые стали, листовые электротехнические стали, некоторые железо-никелевые сплавы (пермаллой) и оксидные ферромагнетики. Они применяются для изготовления магнитопроводов постоянного и переменного потоков.

Техническое железо (углерода до 0,04%) обладает высокой индукцией насыщения (до 2,2 Т), высокой магнитной проницаемостью ($\mu = 3\,500 \div 7\,000$), низкой коэрцитивной силой ($H_c = 50 \div 100$ А/м). Техническое железо, углеродистые стали и чугун применяются для магнитопроводов, работающих в постоянных магнитных полях.

Листовые электротехнические стали представляют собой сплавы железа с кремнием (1—4%). Кремний улучшает свойства технического железа: увеличивает магнитную проницаемость, уменьшает коэрцитивную силу, уменьшает потери от гистерезиса, увеличивает удельное электрическое сопротивление, а следовательно, уменьшает вихревые токи (см. § 3-15) и связанные с ними потери.

Стали с низким содержанием кремния имеют низкую магнитную проницаемость, большую индукцию насыщения, большие удельные потери энергии. Эти стали применяются при постоянном и переменном токах низкой частоты, при высоких значениях магнитной индукции.

Стали с высоким содержанием кремния (2,8—4,8%) применяются при промышленной и повышенной частотах, при необходимости иметь малые потери от гистерезиса и вихревых токов или высокую магнитную проницаемость в слабых и средних полях.

Согласно ГОСТ 802-58 сорта стали обозначаются буквой Э (электротехническая) и цифрами. Первая цифра указывает процентное содержание кремния. Вторая определяет электромагнитные свойства стали. Третья — 0 обозначает холодную прокатку стали.

Основные кривые намагничивания для некоторых сортов стали даны на рис. 3-18.

Пермаллой — это сплав железа, никеля и некоторых других элементов. Эти сплавы обладают высокой магнитной проницаемостью в слабых магнитных полях. Они делятся на высоконикелевые (70—80%) и низконикелевые (40—50% никеля).

Магнитные свойства пермаллоев очень сильно зависят от содержания никеля и от технологии их изготовления.

Буква П в обозначении марки пермаллоя указывает на прямоугольную петлю гистерезиса (рис. 3-19). Прямоугольность петли характеризуют отношением остаточной ин-

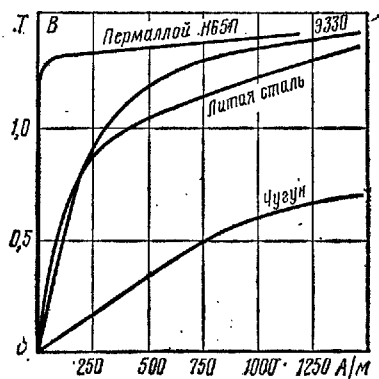


Рис. 3-18. Кривые намагничивания некоторых ферромагнитных материалов.

дукции B_r к максимальной индукции B_m , которое (B_r/B_m) достигает значения 0,95—0,99.

Ферриты — это ферромагнитные материалы, получаемые керамическим методом из смеси мелких порошков окислов железа, цинка, никеля и других элементов. После прессования и обжигания получаются сердечники нужной формы. Ферриты имеют очень большое удельное сопротивление, и, следовательно, потери на вихревые токи очень

малы, что позволяет применять их при высокой частоте.

Никель-цинковые ферриты, получаемые путем термического разложения солей, называются оксидными ферромагнетиками или оксиферами, по магнитным свойствам они близки к ферритам.

Ферриты и оксиферы весьма разнообразны по своим магнитным свойствам, а следовательно, и по применению (магнитотвердые, магнитномягкие, с прямоугольной петлей гистерезиса и др.).

Рис. 3-19. Прямоугольная петля гистерезиса.

Магнитодиэлектрики — это материалы, получаемые из смеси ферромагнитного порошка с диэлектриком, например поливинилхлоридом, полиэтиленом. Смесь формируется, прессуется и запекается.

Ферриты и магнитодиэлектрики широко применяются для сердечников трансформаторов различного назначения, для сердечников аппаратуры проводной и радиосвязи, в вычислительных устройствах, в автоматике и т. д. В частности, широко применяются кольцевые сердечники из ферритов с прямоугольной петлей, обладающие свойством намагничиваться до насыщения при импульсе тока и затем длительно сохранять остаточную индукцию.

б) Магнитотвердые материалы

Магнитотвердые материалы характеризуются большой коэрцитивной силой, большой остаточной индукцией и поэтому используются для изготовления постоянных магнитов самого различного назначения. К этим материалам относятся: углеродистые, вольфрамовые, хромистые, кобальтовые стали, коэрцитивная сила которых

5 000—13 000 А/м, а остаточная индукция 0,7—1 Т. Они обладают ковкостью, поддаются прокатке и механической обработке.

К магнитотвердым материалам относятся также сплавы с различным содержанием железа, алюминия, никеля, кремния, кобальта, известные под названиями: альни, альниси, альнико, магнико и др., обладающие лучшими магнитными свойствами, чем указанные выше материалы. Их коэрцитивная сила 20 000—60 000 А/м, а остаточная индукция 0,2—2,25 Т. Магниты из этих сплавов изготавливаются отливкой и обрабатываются только шлифованием.

Металлокерамические магниты получают спеканием порошков из сплавов альни и альнико.

3-10. Магнитная цепь и ее расчет

Магнитная цепь — это устройство из ферромагнитных сердечников, в которых замыкается магнитный поток. Применение ферромагнетиков имеет целью получение наименьшего магнитного сопротивления (3-21), при котором требуется наименьшая м. д. с. для получения нужного магнитного потока.

Простейшая магнитная цепь — это сердечник кольцевой катушки (рис. 3-11). Применяются магнитные цепи неразветвленные и разветвленные, отдельные участки которых выполняются из одного или из разных материалов.

Расчет магнитной цепи состоит из определения м. д. с. по заданному магнитному потоку, размерам цепи и ее материалам.

Для расчета цепь делят на участки l_1 , l_2 и т. д. с однородным полем, определяют магнитную индукцию $B = \Phi/S$ на каждом из них и по кривым намагничивания (рис. 3-18) находят соответствующие напряженности магнитного поля. Напряженность поля в воздушном зазоре или неферромагнитном материале

$$H_0 = B_0/\mu_0 \approx 0,8 \cdot 10^6 B_0, \quad (3-22)$$

где H выражено в амперах на метр, а B_0 в теслах, или $H_0 = 0,8 B_0$, если H_0 выразить в амперах на сантиметр, а B_0 — в гауссах.

По закону полного тока сумма магнитных напряжений на отдельных участках равна м. д. с., т. е.

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_0 l_0 + \dots = I \omega.$$

Пример 3-6. Сколько витков надо наложить на сердечник (рис. 3-20) для получения магнитного потока $47 \cdot 10^{-4}$ Вб при токе обмотки 25 А. Верхняя часть сердечника выполнена из стали Э330, а нижняя — из литой стали.

Первый из трех участков из стали Э330 имеет длину $l_1 = 56$ см, сечение $S_1 = 36$ см²; второй — из литой стали $l_2 = 17$ см и $S_2 = 48$ см²; третий участок — воздушный зазор $l_0 = 0,5 \cdot 2 = 1$ см, сечение $S_0 = 36$ см².

Решение.

Магнитные индукции на первом, втором и третьем участках:

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{47 \cdot 10^{-4}}{36 \cdot 10^{-4}} = 1,3 \text{ Т};$$

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{47 \cdot 10^{-4}}{48 \cdot 10^{-4}} = 0,98 \text{ Т и}$$

$$B_0 = \frac{\Phi}{S_0} = 1,3 \text{ Т.}$$

По кривой намагничивания для стали Э330 (рис. 3-18) индукции 1,3 Т соответствует напряженность поля 750 А/м.

Магнитное напряжение на первом участке

$$U_{m1} = H_1 l_1 = 750 \cdot 0,56 = 420 \text{ А.}$$

Напряженность поля для второго участка (рис. 3-18)

$$H_2 = 400 \text{ А/м.}$$

Магнитное напряжение на втором участке

$$U_{m2} = H_2 l_2 = 400 \cdot 0,17 = 68 \text{ А.}$$

Напряженность поля в воздушном зазоре

$$H_0 = 0,8 \cdot 10^6 B_0 = 0,8 \cdot 10^6 \cdot 1,3 = 1,04 \cdot 10^6 \text{ А/м.}$$

Магнитное напряжение на зазоре

$$U_{m0} = H_0 l_0 = 1,04 \cdot 10^6 \cdot 0,01 = 10\,400 \text{ А.}$$

Магнитодвижущая сила

$$F_m = U_{m1} + U_{m2} + U_{m0} = 420 + 68 + 10\,400 = 10\,888 \text{ А.}$$

Число витков обмотки

$$\omega = \frac{F_m}{I} = \frac{10\,888}{25} = 436 \text{ витков.}$$

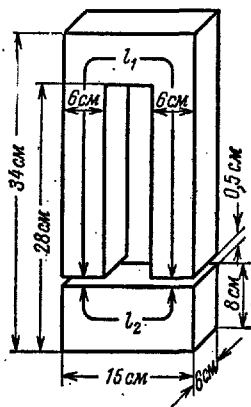


Рис. 3-20. К примеру 3-6.

3-11. Электромагниты

Расположенный вблизи катушки с током стальной сердечник (рис. 3-21, а) намагничивается и под действием электромагнитных сил втягивается в катушку,

стремясь занять положение в середине катушки, при котором магнитное поле будет наибольшим.

Электромагнитом называется устройство, состоящее из намагничивающей катушки и магнитопровода

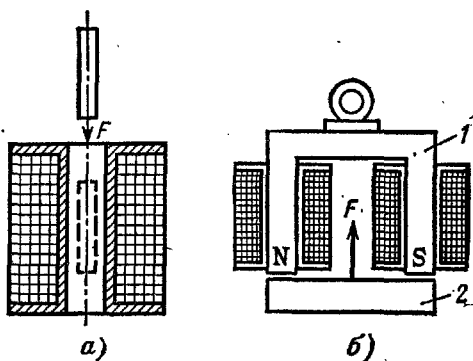


Рис. 3-21. Электромагниты.

a — с разомкнутым сердечником; *б* — с замкнутым сердечником.

(рис. 3-21, б), подвижная часть которого — якорь 2 притягивается к основной части магнитопровода 1 с силой

$$F \approx 4 \cdot 10^5 B^2 S, \quad (3-23)$$

где F — сила, Н;

B — магнитная индукция, Т;

S — площадь сечения полюсов, м².

Если сердечник электромагнита работает в ненасыщенном состоянии, то изменением тока можно изменять магнитную индукцию, а следовательно, и силу электромагнита F .

Электромагниты нашли широкое применение, например для крепления стальных деталей, в электроавтоматах, реле, тормозных устройствах и т. д.

Пример 3-7. Определить силу F притяжения электромагнита, если индукция $B = 1,2$ Т, а сечение полюсов 200 см^2 ($0,02 \text{ м}^2$).

Решение.

Сила притяжения

$$F \approx 4 \cdot 10^5 B^2 S = 4 \cdot 10^5 \cdot 1,2^2 \cdot 0,02 = 1,15 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

3-12. Электромагнитная индукция

а) Электродвижущая сила, наведенная в проводе

При движении провода с постоянной скоростью v с той же скоростью будут перемещаться свободные электроны и положительные ионы провода. Если провод движется в однородном поле перпендикулярно магнитным линиям (рис. 3-22), то на каждую заряженную частицу будет действовать электромагнитная сила (§ 3-1 и 3-2), направление которой определяется правилом левой руки. Под действием этих сил электроны будут перемещаться на один

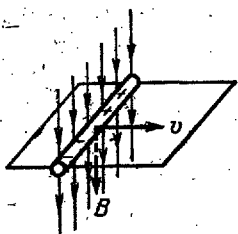


Рис. 3-22. Движение провода в магнитном поле.

конец провода, создавая на нем отрицательный заряд, а на другом конце провода недостаток электронов вызовет положительный заряд. Разделение зарядов прекратится, если электромагнитные силы уравниваются электрическими силами притяжения разноименных зарядов. Так, в результате работы электромагнитных сил в проводнике возникает э. д. с., которую называют э. д. с. электромагнитной индукции, а само явление — электромагнитной

индукцией. В этом случае механическая энергия, затраченная на движение проводника, преобразуется в электрическую. Явление электромагнитной индукции было открыто в 1831 г. английским физиком М. Фарадеем.

На концах незамкнутого провода напряжение U равно э. д. с. электромагнитной индукции E , таким образом (1-3);

$$E = \mathcal{E}l,$$

но так как $\mathcal{E} = F_0/e$, а сила, действующая на электрон (3-6), $F_0 = e v B$, то

$$E = B l v. \quad (3-24)$$

Следовательно, наведенная (индуктированная) в проводе э. д. с. электромагнитной индукции пропорциональна величине магнитной индукции поля, в котором движется проводник, длине провода и скорости его движения в направлении, перпендикулярном магнитным линиям. Это первая формулировка закона электромагнитной индукции.

Направление наведенной э. д. с. определяется правилом правой руки. Ладонь правой руки располагают так, чтобы магнитные линии входили в нее, отогну-

тый под прямым углом большой палец совмещают с направлением движения проводника, тогда вытянутые четыре пальца укажут направление индуцированной э. д. с. (рис. 3-23).

При движении проводника в плоскости, расположенной под углом α к вектору магнитной индукции, э. д. с. определяется только слагающей скорости, нормальной к вектору магнитной индукции, т. е. $v_n = v \sin \alpha$, следовательно,

$$E = Blv_n = Blv \sin \alpha. \quad (3-25)$$

При перемещении проводника со скоростью $v = \Delta b / \Delta t$ в плоскости, нормальной к магнитным линиям поля, наведенная в нем э. д. с.

$$E = Blv = Bl \frac{\Delta b}{\Delta t}.$$

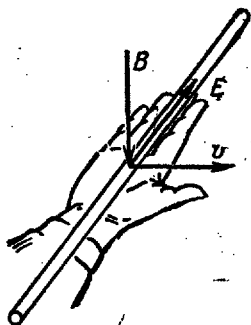


Рис. 3-23. Правило правой руки.

Учитывая, что произведение B и площади $\Delta S = l \Delta b$ равно магнитному потоку $\Delta \Phi = B \Delta S$, пересеченному проводником за время Δt , наведенная в нем э. д. с.

$$E = Bl \frac{\Delta b}{\Delta t} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}. \quad (3-26)$$

Следовательно, наведенная э. д. с. равна скорости пересечения проводником магнитного потока.

б) Электродвижущая сила, наведенная в контуре

При движении контура (рис. 3-24) в неоднородном магнитном поле в плоскости, нормальной к магнитным линиям (на рис. 3-24 показаны крестиками), в направлении, указанном стрелкой, в сторонах контура 1 и 2 наводятся э. д. с. e_1 и e_2 . Направления этих э. д. с., найденные по правилу правой руки, показаны стрелками. В сторонах контура 3 и 4 э. д. с. не наводятся, так как они не пересекают магнитного поля.

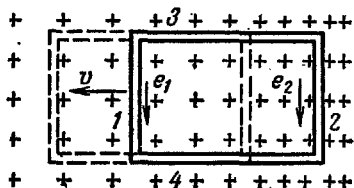
Обозначив $\Delta \Phi_1$ и $\Delta \Phi_2$ потоки, пересеченные соответственно сторонами контура 1 и 2 за время Δt , напомним величины э. д. с. (3-26):

$$e_1 = \frac{\Delta \Phi_1}{\Delta t} \quad \text{и} \quad e_2 = \frac{\Delta \Phi_2}{\Delta t}.$$

В результате движения контура за время Δt пересеченный магнитный поток $\Delta\Phi_1$ окажется внутри контура, а поток $\Delta\Phi_2$ за пределами контура (рис. 3-24). Так как положительное направление э. д. с. связано правилом буравчика с направлением магнитного потока, то направление e_2 будет положительным, а e_1 — отрицательным. Таким образом, наведенная в контуре э. д. с.

$$e = e_2 - e_1 = \frac{\Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1}{\Delta t} = - \frac{\Delta\Phi_1 - \Delta\Phi_2}{\Delta t} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (3-27)$$

При другой форме записи, при которой элементарные приращения потока и времени $\Delta\Phi$ и Δt заменены бесконечно малыми приращениями $d\Phi$ и dt , получим для произвольного момента времени выражение э. д. с., наводимой в контуре:



$$e = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (3-28)$$

Рис. 3-24. Движение контура в магнитном поле.

Из полученного выражения следует, что э. д. с. электромагнитной индукции, наведенная в контуре, равна скорости уменьшения магнитного потока, пронизывающего контур. Это вторая формулировка закона электромагнитной индукции.

Опытом установлено, что безразлично, происходит ли это изменение потока при движении контура в магнитном поле или в результате нарастания или убывания магнитного потока, пронизывающего неподвижный контур.

Если контур состоит из w последовательно соединенных витков, то индуцированная э. д. с. будет:

$$e = - w \frac{d\Phi}{dt}. \quad (3-29)$$

Произведение числа витков и пронизывающего их магнитного потока называется потокоцеплением:

$$\Psi = w\Phi, \quad (3-30)$$

следовательно, индуцированная э. д. с.

$$e = - w \frac{d\Phi}{dt} = - \frac{d\Psi}{dt} \quad (3-31)$$

равна скорости уменьшения потокоцепления.

При движении контура в направлении, указанном на рис. 3-24, магнитный поток, пронизывающий контур, уменьшается, т. е. приращение его отрицательно $\Delta\Phi < 0$,

так как $\Delta\Phi_2 > \Delta\Phi_1$. Следовательно, э. д. с. (3-28) положительна и направлена по ходу часовой стрелки. Так же направлен и ток, вызванный этой э. д. с. Магнитный поток, созданный этим током, имеет то же направление, что и уменьшающийся магнитный поток, в чем легко убедиться, применив правило буравчика. Следовательно, убывание потока, пронизывающего контур, вызывает появление э. д. с. и тока, магнитный поток которого стремится противодействовать убыванию магнитного потока.

При движении контура в обратном направлении поток, пронизывающий контур, увеличивается ($\Delta\Phi > 0$) и э. д. с. (по 3-28) отрицательна и направлена против хода часовой стрелки. Так же направлен и вызванный ею ток. Магнитный поток, созданный этим током, направлен встречно возрастающему магнитному потоку контура. Следовательно, возрастание потока контура приводит к появлению э. д. с. и тока, магнитный поток которого стремится противодействовать увеличению потока контура.

Из сказанного следует: *направление наведенной э. д. с. всегда таково, что вызванный ею ток противодействует причине появления э. д. с.* Это положение было установлено русским академиком Э. Х. Ленцем в 1833 г. и носит название **закона Ленца**.

При увеличении тока в катушке электромагнита (рис. 3-25) или при сближении кольца и электромагнита увеличивается магнитный поток, пронизывающий кольцо, и в нем наводятся э. д. с. и ток i . По закону Ленца направление магнитного потока, созданного током i в кольце, противоположно направлению потока электромагнита, следовательно, направление индуктированного тока i легко определяется по правилу буравчика.

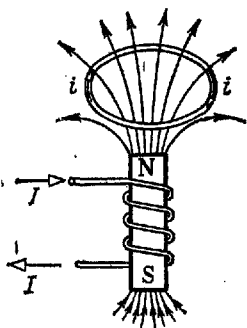


Рис. 3-25. Ток, индуктированный в кольце.

3-13. Принцип работы электрического генератора

При движении провода (рис. 3-26) в направлении вектора скорости v в плоскости, перпендикулярной магнитным линиям, в нем наводится э. д. с. E . Под дей-

ствием ее в замкнутой цепи с сопротивлением R проходит ток I . На провод с током в магнитном поле действует электромагнитная сила $F = BIl$, направление которой, найденное по правилу левой руки, противоположно направлению вектора скорости, следовательно, она является тормозной.

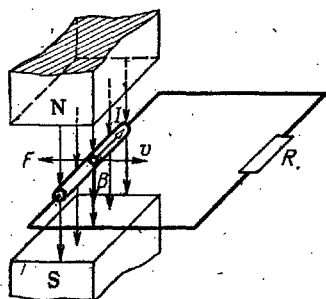


Рис. 3-26. Принцип работы электрического генератора.

Очевидно, для движения провода необходима внешняя сила, равная по величине и противоположная по направлению тормозной силе, т. е. необходим первичный двигатель, развивающий механическую мощность $P_m = Fv$, или

$$P_m = Fv = BIlv = EI = P.$$

Таким образом, полученная проводником механическая энергия при движении его в магнитном поле преобразуется в электрическую, а движущийся под действием механической силы провод в магнитном поле можно рассматривать как простейший электрический генератор.

Как известно (2-8), э. д. с. генератора

$$E = U + U_0 = IR + Ir_0,$$

следовательно, механическая мощность

$$P_m = EI = I^2R + I^2r_0 = UI + P_0 = P_n + P_0$$

равна электрической мощности P , состоящей из мощности приемника энергии $P_n = UI$, и мощности потерь в генераторе $P_0 = I^2r_0$.

3-14. Принцип работы электродвигателя

Если по проводу длиной l , расположенному в однородном поле (рис. 3-27) перпендикулярно магнитным линиям, проходит ток I от источника с напряжением U , то на него действует электромагнитная сила (3-1)

$$F = BIl,$$

направление которой определяется по правилу левой руки.

Под действием этой силы провод будет двигаться со скоростью v , совершая механическую работу, и в нем будет индуцироваться э. д. с., направление которой, найденное

по правилу правой руки, противоположно току. Величина встречной э. д. с.

$$E = Blv.$$

Если сопротивление провода r_0 , то по второму закону Кирхгофа можно написать:

$$U - E = Ir_0$$

или

$$U = E + Ir_0, \quad (3-32)$$

откуда ток в цепи

$$I = \frac{U - E}{r_0}. \quad (3-33)$$

Умножив уравнение (3-32) на ток, найдем электрическую мощность

$$UI = EI + I^2 r_0 = BlvI + I^2 r_0 = Fv + I^2 r_0. \quad (3-34)$$

Произведение $I^2 r$ — это мощность тепловых потерь в проводе, а Fv — механическая мощность.

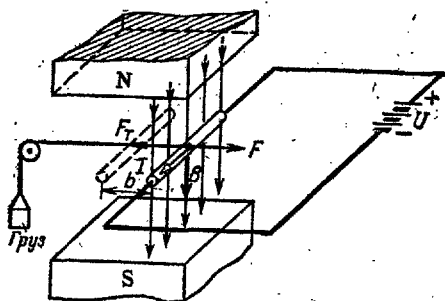


Рис. 3-27. Принцип работы электродвигателя.

Таким образом, полученная проводом электрическая энергия при движении его в магнитном поле преобразуется в механическую, а процесс преобразования энергии связан с наведением противо-э. д. с. Проводник, движущийся в магнитном поле, можно рассматривать как простейший электродвигатель.

Пример 3-8. В магнитном поле с индукцией 1,2 Т перпендикулярно магнитным линиям движется провод длиной 0,5 м со скоростью 20 м/с. Сопротивление провода 0,1 Ом, напряжение на его зажимах 15 В. Определить: 1) мощность цепи; 2) механическую мощность, развиваемую проводом; 3) тепловую мощность.

Решение.

Противо-э. д. с., наводимая в проводе:

$$E = Blv = 20 \cdot 0,5 \cdot 1,2 = 12 \text{ В.}$$

Ток в проводе

$$I = \frac{U - E}{r_0} = \frac{15 - 12}{0,1} = 30 \text{ А.}$$

Мощность цепи

$$P = UI = 15 \cdot 30 = 450 \text{ Вт.}$$

Механическая мощность

$$P_M = EI = 12 \cdot 30 = 360 \text{ Вт.}$$

Тепловая мощность

$$P_T = I^2 r_0 = 30^2 \cdot 0,1 = 90 \text{ Вт.}$$

3-15. Вихревые токи

На рис. 3-28 изображен укрепленный на оси металлический диск прибора и следы полюсов двух электромагнитов. Последние создают магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , пронизывающие диск, векторы магнитной индукции их B_1 и B_2 показаны на рисунке.

При всяком изменении тока в обмотке первого электромагнита изменяется магнитный поток Φ_1 и в диске индук-

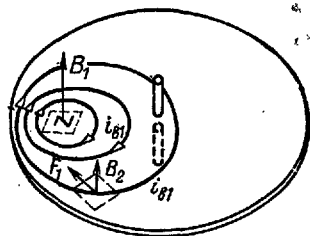


Рис. 3-28. Вихревые токи в диске, вызванные изменением магнитного потока.

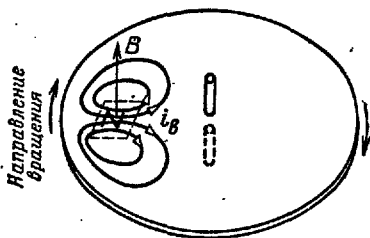


Рис. 3-29. Вихревые токи в диске при неизменном магнитном потоке и вращении диска.

тируются кольцевые или, как их обычно называют, в и х р е в ы е т о к и $i_{в1}$, аналогичные токам в кольце (рис. 3-25). Направление вихревых токов определяется так же, как и направление токов в кольце.

В результате взаимодействия вихревых токов $i_{в1}$ с магнитным потоком Φ_2 возникает электромагнитная сила F_1 , вызывающая вращение диска.

На рис. 3-29 показан металлический диск счетчика электрической энергии и след полюса постоянного магнита.

При вращении диска участки его, расположенные над полюсом магнита, пересекают магнитные линии, и в диске возникают вихревые токи i_v . Направление наведе-

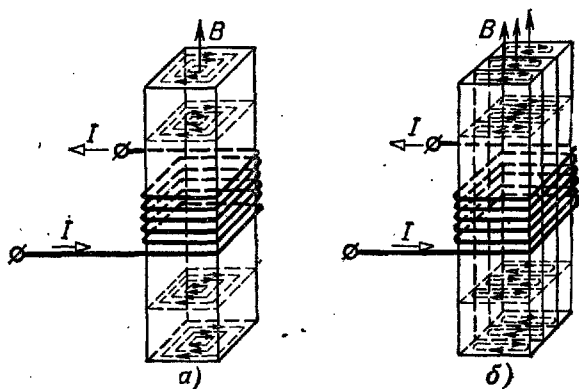


Рис. 3-30. Вихревые токи в стальном сердечнике.

денной э. д. с. и совпадающих с ней по направлению вихревых токов определяется по правилу правой руки.

В результате взаимодействия этих токов с магнитным полем того же постоянного магнита создается электромагнитная сила и возникает тормозной момент, необходимый, например, для работы электросчетчика.

Вихревые токи возникают также в результате изменения магнитных потоков, пронизывающих металлические сердечники (рис. 3-30, а и 3-31, а); кожухи и другие части электрических машин и аппаратов. В этом случае вихревые токи не только нагревают металл, по которому они проходят, но и создают свои магнитные поля, которые противодействуют причине, их вызывающей. Нагревание вихревыми токами происходит за счет расхода электрической энергии и преобразования ее в тепловую, которую называют потерей от вихревых токов. Мощность

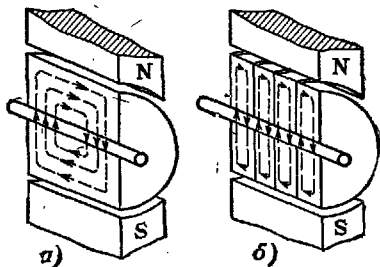


Рис. 3-31. Вихревые токи в якоре электрической машины.

а — сердечник якоря массивный; б — сердечник из стальных дисков.

удельных потерь в стали от вихревых токов выражается в ваттах на килограмм. Вихревые токи можно использовать в печах и в нагревательных устройствах различного назначения.

В электрических машинах и аппаратах вихревые токи обычно нежелательны, так как вызывают дополнительные потери и снижают их к. п. д.

Для уменьшения вихревых токов применяются сердечники, выполненные из сортов стали с повышенным удельным электрическим сопротивлением стали, содержащие 0,5—4,8% кремния. Кроме того, сердечники машин, в которых наводятся вихревые токи, набираются из тонких (0,1—0,5 мм) изолированных друг от друга листов стали (рис. 3-30,б и 3-31,б).

3-16. Индуктивность. Электродвижущая сила самоиндукции

При прохождении тока по цепи каждый контур или виток катушки пронизывается собственным магнитным потоком, который называется *потокосцеплением самоиндукции* Φ_L . Сумма потоков самоиндукции всех витков контура или катушки называется *потокосцеплением самоиндукции* Φ_L . При постоянной магнитной проницаемости среды магнитный поток и потокосцепление самоиндукции пропорциональны току.

Отношение потокосцепления самоиндукции к току контура или катушки при неизменной магнитной проницаемости среды постоянно и называется *индуктивностью*:

$$L = \Phi_L / I. \quad (3-35)$$

Индуктивность характеризует связь потокосцепления самоиндукции с током контура.

Единицей измерения индуктивности в системе СИ служит *генри* (Г):

$$[L] = \left[\frac{\Psi_L}{I} \right] = \frac{\text{Вб}}{\text{А}} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}} = \text{Ом} \cdot \text{с} = \text{Г}.$$

Ом-секунда или генри — крупная единица, поэтому часто пользуются дольными единицами — миллигенри ($1 \text{ мГ} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Г}$) и микрогенри ($1 \text{ мкГ} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Г}$).

Условное обозначение участка цепи, обладающего индуктивностью, показано на рис. 3-32.

Определим индуктивность кольцевой катушки. Потокосцепление кольцевой катушки (3-20)

$$\Psi_L = \omega \Phi = \mu_a \frac{I \omega^2}{l} S,$$

а индуктивность ее

$$L = \frac{\Psi_L}{I} = \mu_a \frac{\omega^2}{l} S. \quad (3-36)$$

Таким образом, индуктивность катушки зависит от размеров катушки, от числа витков и от магнитной проницаемости среды (сердечника):

Рис. 3-32. Условное обозначение индуктивности.



Пример 3-9. Длина катушки 30 см, диаметр ее 5 см, число витков 2 000. Сердечник немагнитный ($\mu_a = \mu_0$). Определить индуктивность катушки.

Решение.

Индуктивность катушки определяем по (3-36)

$$L = \mu_0 \frac{\omega^2 S}{l} = 125 \cdot 10^{-8} \frac{2^2 \cdot 10^6 \cdot \pi \cdot 5^2 \cdot 10^4}{0,3 \cdot 4} \approx 32 \text{ мГ.}$$

Всякое изменение тока в цепи (в контуре) сопровождается изменением магнитного потока и потокосцепления самоиндукции, а следовательно, возникновением э. д. с., которая в этом случае называется э. д. с. с а м о и н д у к ц и е й. Явление возникновения э. д. с. в контуре вследствие изменения тока в этом контуре называется с а м о и н д у к ц и е й.

Величина э. д. с. самоиндукции определяется по (3-29):

$$e_L = - \frac{d\Psi_L}{dt}$$

или, заменив $d\Psi_L = d(Li)$, получим:

$$e_L = - \frac{d\Psi_L}{dt} = - \frac{d(Li)}{dt} = - L \frac{di}{dt}. \quad (3-37)$$

Следовательно, э. д. с. самоиндукции пропорциональна индуктивности и скорости изменения тока в цепи.

Направление э. д. с. самоиндукции определяется по закону Ленца. При увеличении тока, т. е. при $di/dt > 0$, э. д. с. e_L отрицательна и, следовательно, направлена встречно току; наоборот, при уменьшении тока, т. е. при

$di/dt < 0$ э. д. с. e_L положительна и, следовательно, направлена одинаково с током.

Пример 3-10. Определить э. д. с. самоиндукции, если в цепи с индуктивностью 5 мГ ток уменьшается со скоростью 600 А/с.

Решение.

Так как скорость уменьшения тока

$$di/dt = 600 \text{ А/с},$$

то э. д. с. самоиндукции

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = 5 \cdot 10^{-3} \cdot 600 = 3 \text{ В}.$$

3-17. Энергия магнитного поля

При включении цепи, обладающей сопротивлением и индуктивностью, на постоянное напряжение ток в ней от нуля постепенно увеличивается до своего конечного значения

$$I = U/r.$$

Одновременно с возрастанием тока в окружающем пространстве создается магнитное поле, в котором сосредотачивается часть энергии, израсходованной источником тока. Эта энергия проявляет себя, например, при коротком замыкании цепи, обеспечивая прохождение тока до тех пор, пока она не будет полностью израсходована на нагревание проводников цепи. Она также обнаруживается по силовому воздействию на провод с током, расположенный в данном поле.

При включении цепи на постоянное напряжение в процессе увеличения тока в катушке будет индуцироваться э. д. с. самоиндукции $e_L = -L \frac{di}{dt}$. Применяв второй закон Кирхгофа, напишем:

$$U + e_L = ir,$$

откуда

$$U = ir - e_L = ir + L \frac{di}{dt}. \quad (3-38)$$

Таким образом, напряжение на зажимах цепи состоит из двух слагающих. Первая слагающая напряжения ir определяется по закону Ома. Вторая слагающая напряжения $L \frac{di}{dt}$ равна по величине и противоположна по направлению e_L ; она уравнивает возникающую в цепи э. д. с. самоиндукции.

Умножив обе части уравнения (3-38) на произведение $i dt$, получим:

$$Ui dt = i^2 r dt + Li di.$$

Левая часть этого уравнения выражает собой энергию, полученную цепью за время dt , правая часть того же уравнения показывает, что часть энергии $i^2 r dt$ расходуется на нагревание проводов цепи, другая же часть полученной энергии $Li di$ запасается в магнитном поле цепи.

Суммируя приращения энергии при увеличении тока от нуля до значения I , получим энергию, запасенную в магнитном поле цепи:

$$W_m = \int_0^I Li di = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Psi I}{2}. \quad (3-39)$$

3-18. Взаимная индуктивность

Явление индуктирования э. д. с. в одной цепи (катушке) при изменении тока в другой цепи (катушке) называется **взаимной индукцией**.

Ток I_1 , проходя по виткам первой катушки (рис. 3-33, а), вызывает магнитный поток, часть которого Φ_{12} пронизы-

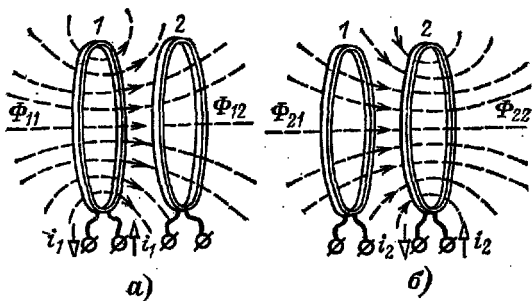


Рис. 3-33. Магнитная связь двух катушек.

вает витки второй катушки ω_2 , образуя потокосцепление взаимной индукции $\Psi_{12} = \omega_2 \Phi_{12}$.

Магнитный поток Φ_{12} , а следовательно, и потокосцепление пропорциональны току I_1 , т. е.

$$\Psi_{12} = M_{12} I_1 \quad \text{или} \quad M_{12} = \Psi_{12} / I_1. \quad (3-40)$$

Отношение потокосцепления одной катушки к току другой катушки, возбуждающему это потокосцепление,

называется взаимной индуктивностью двух катушек (цепей).

Из сопоставления (3-35) и (3-40) следует, что единица измерения взаимной индуктивности та же, что и самоиндукции, т. е. генри (Г).

Ток I_2 , проходя по виткам второй катушки (рис. 3-33, б), вызывает магнитный поток Φ_{21} , пронизывающий витки первой катушки ω_1 , образуя потокоцепление взаимной индукции $\Psi_{21} = \omega_1 \Phi_{21}$.

Аналогично рассмотренному выше случаю выражения потокоцепления и взаимной индуктивности имеют вид:

$$\Psi_{21} = M_{21} I_2 \quad \text{или} \quad M_{21} = \Psi_{21} / I_2, \quad (3-41)$$

причем можно доказать, что всегда для двух контуров

$$M_{12} = M_{21} = M,$$

т. е. индексы при M не нужны.

Взаимная индуктивность зависит от числа витков катушек, от их размеров и формы, от взаимного расположения и от магнитной проницаемости среды.

При изменении тока в первой катушке изменяется потокоцепление взаимной индукции и согласно закону электромагнитной индукции (§ 3-12) во второй катушке индуцируется э. д. с. взаимной индукции

$$e_2 = - \frac{d\Psi_{12}}{dt} = - M \frac{di_1}{dt}. \quad (3-42)$$

При изменении тока во второй катушке также изменяется потокоцепление взаимной индукции и в первой катушке индуцируется э. д. с. взаимной индукции.

$$e_1 = - \frac{d\Psi_{21}}{dt} = - M \frac{di_2}{dt}. \quad (3-43)$$

Таким образом, величина э. д. с. взаимной индукции пропорциональна взаимной индуктивности катушек и скорости изменения тока.

Взаимная индуктивность двух катушек связана с индуктивностями катушек L_1 и L_2 следующим выражением:

$$M = k \sqrt{L_1 L_2},$$

где k — коэффициент связи двух катушек, характеризующий степень индуктивной связи катушек.

Коэффициент связи зависит от взаимного расположения катушек. Чем ближе друг к другу расположены катушки, тем большее значение имеет коэффициент связи и, наоборот, при увеличении расстояния между катушками он уменьшается, стремясь к нулю.

Явление взаимной индукции находит полезное применение в различных аппаратах и машинах, например, для передачи энергии из одной электрической цепи в другую либо для повышения или понижения напряжения при помощи трансформатора.

Иногда явление взаимной индукции может быть крайне нежелательным, например, если параллельно воздушной линии электропередачи расположена линия связи, то в последней может индуцироваться э. д. с. взаимной индукции, создающая помехи в работе линии связи.

Глава четвертая

Электрические машины постоянного тока

4-1. Назначение машин постоянного тока

Электрическими машинами называются устройства для преобразования механической энергии в электрическую или электрической в механическую. В первом случае они называются генераторами, а во втором электродвигателями.

Электрические генераторы постоянного тока применяются для питания электродвигателей, установок для электролиза, для зарядки аккумуляторов и т. д. Электродвигатели постоянного тока приводят во вращение механизмы, требующие больших пусковых вращающих моментов и широкого регулирования частоты вращения, например: электрический транспорт, шахтные подъемники, прокатные станы. В автоматических устройствах машины постоянного тока служат исполнительными двигателями, измерителями частоты вращения, преобразователями сигналов и др. В специальных устройствах металлообрабатывающих станков машины постоянного тока позволяют значительно упрощать механические схемы регулирования скорости.

4-2. Устройство машины постоянного тока

В основе работы машины постоянного тока лежат принципы, изложенные в § 3-13 и 3-14. Эскиз двухполюсной машины постоянного тока представлен на рис. 4-1. Машина состоит из стальной станины 1 и вращающегося якоря 2. На станине при помощи болтов укреплены полюсы 3. На полюсах (рис. 4-2)

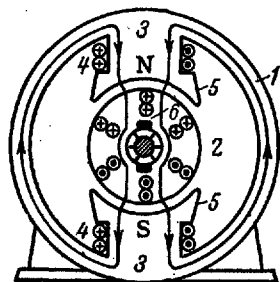


Рис. 4-1. Двухполюсная машина постоянного тока.

помещается обмотка возбуждения 4 (рис. 4-1), по виткам ω_v которой проходит ток возбуждения I_v . Магнитодвижущая сила (м. д. с.) обмотки возбуждения, равная $I_v \omega_v$, создает магнитный поток возбуждения Φ_v , замыкающийся через полюсы, воздушный зазор между полюсами и якорем, через якорь и станину (рис. 4-1).

Полюсы набираются из стальных листов, и тело их оканчивается полюсными наконечниками 5, форма которых определяет распределение магнитной индукции B_δ в воздушном зазоре.

Устройство якоря машины показано на рис. 4-3. Это цилиндр 1, набранный из штампованных стальных листов, изолированных друг от друга и запрессованных на валу 2 (рис. 4-3, а). В его пазы 3 укладываются провода обмотки

Полюсы набираются из стальных листов, и тело их оканчивается полюсными наконечниками

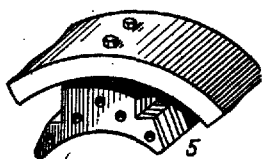


Рис. 4-2. Полюс машины.

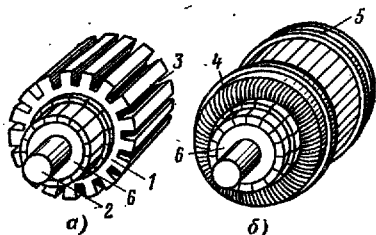


Рис. 4-3. Якорь машины.

якоря 4 (рис. 4-3, б), соединяемые друг с другом по определенной схеме, представляющей собой последовательно-параллельное (смешанное) соединение. Обмотка якоря изолируется от пазов и крепится в них специальными клиньями или бандажными 5.

На валу якоря 2 помещается цилиндрический коллектор 6, электрически изолированный от вала. Кол-

лктор (рис. 4-4) состоит из клиновидных медных пластин 1, изолированных друг от друга миканитовыми прокладками, набранными на втулке 2 и закрепленными на ней болтами. К выступам коллекторных пластин 3, называемых «п е т у ш к а м и», припаиваются определенные концы проводников, составляющих обмотку якоря. К поверхности коллектора прилегают угольные или графитовые неподвижные щетки 6 (рис. 4-1), к которым присоединяются провода внешней сети. Таким образом, провода внешней сети через щетки и коллектор соединяются с вращающейся обмоткой якоря.

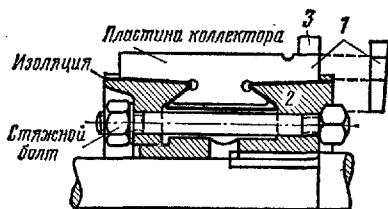


Рис. 4-4. Конструкция коллектора.

Другое назначение коллектора — преобразование переменных э. д. с., наводимых в проводах обмотки якоря, в постоянную э. д. с. машины *Е* на основе переключений (коммутации).

Устройство щеточного механизма показано на рис. 4-5. Щетки в форме угольных или графитных призм 1 помещены в обоймы 2 щеткодержателя. Щеткодержатель крепится на специальном пальце (болте), проходящем сквозь отверстие 4 и установленном на подшипниковом щите машины изолированно от нее. Гибкие медные проводники

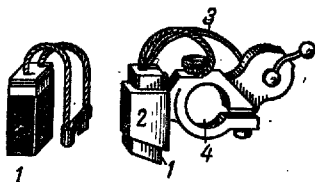


Рис. 4-5. Щетки и щеткодержатель.

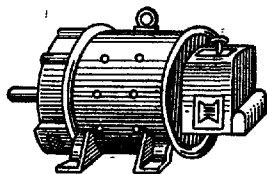


Рис. 4-6. Внешний вид машины постоянного тока.

осуществляют контакт щеток с зажимами цепи якоря на изолирующем щитке, обозначенными буквами $Я_1$, $Я_2$.

Зажимы обмоток возбуждения, расположенные на том же щитке, обозначаются буквами $Ш_1$ и $Ш_2$ — параллельная (шунтовая); $С_1$, $С_2$ — последовательная (серийная) и $Д$, $Д$ — дополнительных полюсов (§ 4-11—4-13). Внешний вид машины постоянного тока показан на рис. 4-6.

4-3. Принцип работы машины постоянного тока

Упрощенная схема работы машины постоянного тока показана на рис. 4-7. Щетки присоединены к ножам перекидного рубильника переключателя 1, что позволяет соединять якорь с нагрузкой r или с питающей сетью. Обмотка возбуждения 2 подключена к внешней сети.

Пусть якорь, соединенный с электрической нагрузкой r , приводится во вращение первичным двигателем, например тепловым. Тогда в обмотке якоря, вращающейся в магнитном поле, созданном током возбуждения I_B , наводится э. д. с. E и в сопротивлении r проходит ток. Направление э. д. с. и тока в якоре I_A , найденное по правилу правой руки, показано на рис. 4-7. Направление электромагнитных сил F_T , действующих на провода с током, находящиеся в магнитном поле, также показано на рис. 4-7. Эти силы создают тормозной момент на валу машины. Первичным двигателем создается вращающий момент M_B , встречный тормозному моменту. Таким образом, как это было показано в § 3-13, машина работает в режиме генератора, превращая механическую энергию в электрическую.

Рис. 4-7. Принцип работы машины постоянного тока.

По закону Ома ток

$$I = I_A = \frac{E}{r + r_A}. \quad (4-1)$$

Следовательно,

$$E = Ir + Ir_A = U + Ir_A, \quad (4-2)$$

т. е. э. д. с. E генератора больше напряжения U на величину падения напряжения в якоре Ir_A .

Если вал этой машины отсоединить от первичного двигателя, а ножи переключателя 1 перевести в верхнее положение (рис. 4-7), то в обмотке якоря установится ток $I = I_A$, направление которого обратно рассмотренному ранее. Электромагнитные силы, созданные взаимодействием этого тока и магнитного поля, имеют также обратное на-

правление и будут создавать вращающий момент M_v , под действием которого якорь будет вращаться в прежнем направлении. В этом случае электрическая энергия, поступающая из сети, превращается в механическую (см. § 3-14) и машина работает электродвигателем.

Коллектор и щетки осуществляют переключение секций обмотки вращающегося якоря таким образом, чтобы при переходе активных проводников из зоны северной полярности в зону южной в них изменялось направление тока, что необходимо для сохранения постоянного направления вращения.

В обмотке якоря электродвигателя, так же как и в обмотке генератора, наводится э. д. с. E . Только теперь направление ее будет встречно току I_a , в чем легко убедиться, применив правило правой руки. Эта э. д. с. называется встречной э. д. с. или *противо-э. д. с.*

По второму закону Кирхгофа

$$U - E = I_a r_a, \quad \text{или} \quad E = U - I_a r_a, \quad (4-3)$$

а ток

$$I_a = \frac{U - E}{r_a}. \quad (4-4)$$

При работе машины электродвигателем э. д. с. E меньше напряжения на зажимах якоря U на величину падения напряжения в обмотке якоря $I_a r_a$.

Изменение направления вращения электродвигателя производится изменением направления тока в цепи якоря или в обмотке возбуждения. Одновременное изменение направлений токов в обеих обмотках не вызывает изменения направления вращения, в чем легко убедиться, рассматривая рис. 4-7.

4-4. Устройство обмотки якоря

Упрощенная схема обмотки якоря показана на рис. 4-8.

Между двумя полюсами вращается якорь с шестью пазами, в которых помещены изолированные провода обмотки якоря в два слоя. Для упрощения пазы якоря не показаны. Из рис. 4-8 видно, что от коллекторной пластины 1 провод по переднему торцу якоря идет в верхний слой первого паза от зрителя за плоскость чертежа. Далее, по заднему торцу якоря, что показано пунктиром, он попадает в нижний слой четвертого паза и, выходя оттуда

по переднему торцу якоря, присоединяется к коллекторной пластине 2. От второй коллекторной пластины провод попадает в верхний слой второго паза и т. д.

Проследив до конца ход провода обмотки, можно заметить, что она замкнута на себя и состоит из одинаковых частей — секций, присоединенных к двум соседним коллекторным пластинам. В проводах секций, лежащих в пазах, при вращении якоря наводится э. д. с., поэтому они называются активными сторонами секции. В частях провода, расположенного на торцах якоря и называемых л о б о в ы м и, э. д. с. не наводится. Вид отдельной секции показан на рис. 4-9; активные стороны

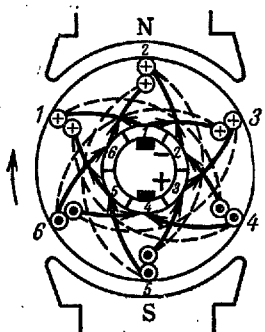


Рис. 4-8. Схема обмотки якоря.

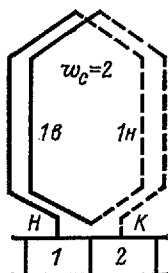
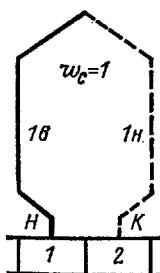


Рис. 4-9. Секция обмотки якоря.

верхнего слоя сплошной линией, а нижнего пунктирной. Секция может иметь один или несколько витков. Чтобы придать секциям необходимую форму, они изготавливаются на специальном шаблоне, изолируются и укладываются в пазы сердечника якоря.

Так как к каждой коллекторной пластине припаиваются два провода — конец предыдущей секции и начало следующей за ней, то число коллекторных пластин K должно быть равно числу секций обмотки якоря. Для обмотки, показанной на рис. 4-8, якорь имеет число пазов $Z = 6$ и такое же количество секций. Зная K , можно определить число активных проводов, составляющих обмотку якоря $N = 2w_c K$, где w_c — число витков в секции.

Для рассмотрения обмоток удобна схема рис. 4-10. Это развертка цилиндрической поверхности якоря с его обмоткой, изображенной на рис. 4-8. На рис. 4-8 и 4-10 показано направление э. д. с., наведенных в активных проводах,

найденное по правилу правой руки. Величина э. д. с., наведенных в каждой секции, $e = E_m \sin \omega t$ (см. § 5-2), а сумма всех э. д. с. в замкнутой на себя обмотке равна нулю. Однако, обходя обмотку, например, от первой коллекторной пластины в направлении э. д. с., можно заметить, что у четвертой коллекторной пластины э. д. с. меняет знак. Это служит признаком узла двух параллельных ветвей, образуемых относительно внешней цепи. Двигаясь далее по обмотке встречно э. д. с., можно обнаружить

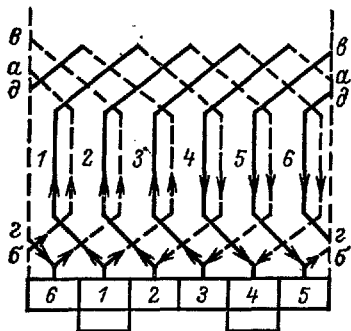


Рис. 4-10. Развернутая схема обмотки якоря.

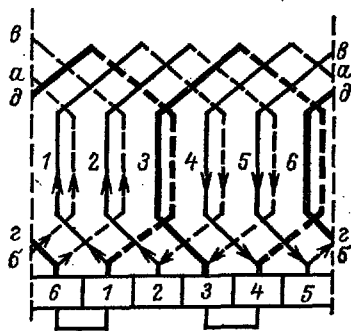


Рис. 4-11. Развернутая схема обмотки якоря.

второй узел у коллекторной пластины 1, где э. д. с. опять меняет направление.

Таким образом, обмотка состоит из двух параллельных ветвей ($2a=2$) с двумя узлами. Узел у четвертой коллекторной пластины является точкой высшего потенциала (+), а у первой низшего потенциала (—). На эти коллекторные пластины и ставятся щетки. Величина напряжения между двумя щетками для момента времени, соответствующего положению якоря на рис. 4-8 и 4-10, равна:

$$u_1 = e_1 + e_4 + e_2 + e_5 + e_3 + e_6 = e_4 + e_1 + e_5 + e_2 + e_6 + e_3.$$

При повороте якоря на 60° полярность щеток и величина u_1 сохраняются прежними, так как шестой паз займет место первого, а первый второго и т. д.

При повороте якоря на угол, меньший 60° , например на 30° , положение обмотки будет таким, как представлено на рис. 4-11, где для упрощения смещены влево щетки, а не обмотка. Две секции в этом положении оказываются замкнутыми накоротко, а в каждой из двух параллельных ветвей включены только по две секции.

Напряжение машины в этот момент равно $u_2 = e_1 + e_4 + e_2 + e_5 = e_4 + e_1 + e_5 + e_2$. Таким образом, при вращении якоря напряжение на зажимах якоря постоянно по направлению, но изменяется по величине от u_1 до u_2 . Чем больше секций включено в каждую параллельную ветвь, тем меньше пульсации напряжения, и в современных машинах, где число секций велико, они так малы, что напряжение U считается неизменным.

Плоскость, перпендикулярная к оси полюсов, проходящая через ось якоря, т. е. на равном расстоянии от полюсов, называется геометрической нейтралью (рис. 4-12).

Замкнутые накоротко секции всегда движутся в зоне геометрической нейтрали, где индукция B_δ равна нулю или очень мала. Поэтому наведенная в секциях э. д. с. равна нулю или незначительна.

Изложенный принцип устройства обмотки якоря сохраняется и в современных машинах, хотя они могут иметь большое число полюсов, параллельных ветвей, секций и, значит, коллекторных пластин.

4-5. Электродвижущая сила обмотки якоря

Как было сказано ранее, э. д. с. машины равна сумме э. д. с. последовательно соединенных проводов одной параллельной ветви. Эти э. д. с. различны по величине, так как магнитная индукция в различных точках воздушного зазора по окружности якоря не одинакова. Однако э. д. с. машины можно найти через среднее значение э. д. с. провода, умноженное на число проводов одной параллельной ветви.

Пусть магнитный поток одного полюса Φ (рис. 4-7), число полюсов машины $2p$, осевая длина тела якоря l , его диаметр d и боковая поверхность S . Тогда среднее значение магнитной индукции на поверхности якоря:

$$B_{cp} = \frac{\Phi \cdot 2p}{S} = \frac{\Phi \cdot 2p}{\pi dl}, \quad (4-5)$$

а среднее значение э. д. с. каждого провода

$$E_{cp} = B_{cp}lv = \frac{\Phi \cdot 2p}{\pi dl} \frac{\pi dn}{60} = \Phi \cdot 2p \frac{n}{60},$$

где n — частота вращения якоря, об/мин.

Если все число проводов обмотки N , а число параллельных ветвей ее — $2a$, то в каждой параллельной ветви

будет последовательно включено $N/2a$ проводов. Тогда э. д. с. параллельной ветви, а значит, и э. д. с. машины

$$E = E_{\text{ср}} \frac{N}{2a} = 2\rho \frac{n}{60} \frac{N}{2a} \Phi = \frac{\rho}{a} \frac{n}{60} N \Phi \quad (4-6)$$

или

$$E = c_E \Phi n, \quad (4-7)$$

где $c_E = \rho N / a \cdot 60$ — постоянная машины.

Следовательно, величина э. д. с. машины пропорциональна магнитному потоку и частоте вращения якоря.

4-6. Электромагнитный момент на валу машины

Из § 3-1 известно, что на каждый провод с током, находящийся в магнитном поле, действует электромагнитная сила

$$F_{\text{пр}} = B_{\text{ср}} l I = \frac{\Phi \cdot 2\rho}{\pi d l} l \frac{I_{\text{я}}}{2a} = \frac{\rho \Phi}{\pi d a} I_{\text{я}},$$

где $B_{\text{ср}}$ — среднее значение магнитной индукции;
 d и l — диаметр и длина якоря;
 $\Phi \cdot 2\rho$ — полный поток многополюсной машины;
 $I = I_{\text{я}}/2a$ — ток параллельной ветви, т. е. ток одного провода.

Момент каждого провода обмотки якоря

$$M_{\text{пр}} = F_{\text{пр}} \frac{d}{2} = \frac{\Phi \rho}{\pi d a} \frac{d}{2} I_{\text{я}} = \frac{\rho \Phi}{2\pi a} I_{\text{я}}.$$

Полный электромагнитный момент машины при N проводов обмотки

$$M = M_{\text{пр}} N = \frac{\rho}{2\pi a} N \Phi I_{\text{я}} = c_M \Phi I_{\text{я}}, \quad (4-8)$$

где $c_M = \frac{\rho}{2\pi a} N$ — постоянная величина.

Если машина работает генератором, то при наличии нагрузки (тока в обмотке якоря) момент будет тормозной ($M_{\text{т}}$); при работе ее двигателем момент будет вращающим ($M_{\text{вр}}$).

Электромагнитный момент двигателя M при любом режиме уравновешивается статическим моментом сопротивления $M_{\text{с}}$ и динамическим моментом вращающихся масс $M_{\text{ж}} = J d\omega/dt$, где J — момент инерции, а производная $d\omega/dt$ — приращение угловой скорости.

Момент инерции $J = m \rho^2$, где m — масса вращающегося тела, ρ — приведенный радиус инерции.

Уравнение движения имеет вид:

$$M = -(M_c + M_J).$$

При увеличении скорости $\omega = 2\pi n$ динамический момент M_J будет положительным, а при уменьшении — отрицательным. Если иметь в виду не моменты сопротивления, а составляющие вращающего момента M , то

$$M = M_c + M_J. \quad (4-9)$$

При $M > M_c$ на валу появляется положительный момент M_J и скорость возрастает, в обратном случае она падает.

При постоянной частоте вращения ($n = \text{const}$) электромагнитный вращающий момент $M = c_M I_a \Phi$ уравновешен моментом сопротивления M_c , который состоит из суммы моментов: M_0 — момента холостого хода, обусловленного трением и потерями в стали двигателя, и полезного момента M_2 , обусловленного работой приводимого механизма

$$M_c = M_0 + M_2. \quad (4-10)$$

4-7. Механическая мощность машины постоянного тока

Ранее было показано (§ 3-13 и 3-14), что в процессе преобразования механической энергии в электрическую или обратно механическая мощность равна мощности EI . Покажем это для электрической машины. Пусть F — окружная сила, приложенная к якору касательно к его окружности, а v — линейная скорость на внешней поверхности якоря. Тогда полная механическая мощность

$$P_m = Fv.$$

Подставив в это выражение $F = 2M/d$ и $v = \omega d/2$, получаем

$$P_m = \frac{2M}{d} \omega \frac{d}{2} = M\omega. \quad (4-11)$$

Вращающий момент машины $M = (p/2\pi a) N \Phi I_a$ и, следовательно, механическая мощность

$$P_m = \frac{p}{2\pi a} N \Phi I_a \frac{2\pi n}{60} = \Phi N \frac{p}{a} \frac{n}{60} I_a = E I_a. \quad (4-12)$$

Произведение $E I_{\text{я}}$ часто называют электромагнитной мощностью машины $P_{\text{эм}}$. Когда машина работает генератором, мощность $E I_{\text{я}}$ больше мощности $U I_{\text{я}}$, так как $E > U$; при работе машины электродвигателем $U I_{\text{я}}$ больше $E I_{\text{я}}$, так как противо-э. д. с. $E < U$. Разница мощностей в обоих случаях численно равна мощности тепловых потерь в обмотке якоря $I_{\text{я}}^2 r_{\text{я}}$.

4-8. Реакция якоря машины постоянного тока

При холостом ходе машины независимо от режима работы генератором или электродвигателем ток в якоре $I_{\text{я}}$ или равен нулю, или очень мал. В этом случае магнитный поток ее $\Phi_{\text{в}}$ создается только магнитодвижущей силой $F_{\text{в}}$ и замыкается через якорь вдоль полюсов и статорины. На рис. 4-12 этот поток показан направленным сверху вниз (от полюса N к полюсу S).

В проводах якоря нагруженной машины устанавливается ток $I_{\text{я}}$, который при генераторном режиме (рис. 4-12)

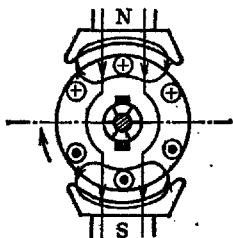


Рис. 4-12. Поперечная реакция якоря.

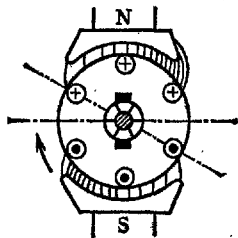


Рис. 4-13. Магнитная индукция в воздушном зазоре при поперечной реакции якоря.

направлен в одну сторону с э. д. с., определенной по правилу правой руки. Тогда м. д. с. якоря $F_{\text{я}}$ создает свой магнитный поток $\Phi_{\text{я}}$, замыкающийся через якорь, воздушный зазор и полюсные наконечники. Если по отношению к направлению вращения считать левый край полюсного наконечника как бы набегающим на поверхность якоря, а правый — сбегающим, то можно заметить, что набегающий край полюса размагничивается поперечным потоком якоря, а сбегающий намагничивается. Картина перераспределения магнитной индукции B_{δ} в воздушном зазоре для этого случая показана на рис. 4-13.

Результирующий поток машины Φ сдвигается в направлении вращения якоря; в ту же сторону смещается и нейтраль машины, называемая в отличие от геометрической — физической нейтралью.

В результате насыщения стали (§ 3-8) размагничивающее действие поперечного потока на набегающем краю полюса больше, чем намагничивающее на сбегающем краю, и магнитный поток машины уменьшается ($\Phi < \Phi_v$). Влияние м. д. с. якоря на величину магнитного потока машины при нагрузке называется реакцией якоря.

При работе машины электродвигателем ток в якоре (рис. 4-12) направлен навстречу э. д. с., якорь вращается в обратную сторону и поперечная реакция якоря смещает результирующий поток Φ и физическую нейтраль против направления вращения якоря.

4-9. Коммутация тока

В § 4-4 было показано, что для получения постоянной по направлению и почти постоянной по величине э. д. с. E конструируется обмотка якоря, состоящая из $2a = 2, 4, 6$ и т. д. параллельных ветвей, секции которых непрерывно одна за другой переключаются из одной ветви в другую. Механическим переключателем секций служит коллектор и щетки. Процесс переключения секций, поочередно переходящих из одной параллельной ветви в другую, и совокупность явлений, происходящих при этом, называется коммутацией. Переключаемая секция замкнута щеткой накоротко и находится в это время вблизи от геометрической нейтрали. Электродвижущая сила, наводимая в секции внешним полем полюсов, почти равна нулю. Время T , в течение которого совершается переключение и секция замкнута накоротко, составляет тысячные доли секунды и называется периодом коммутации. Рассмотрим очень упрощенно процесс коммутации.

Подлежащая рассмотрению секция (рис. 4-10), лежащая в пазах 6 и 3, показана отдельно на рис. 4-14. Предположим, что обмотка вращается очень медленно ($T \approx \infty$), ширина щетки равна ширине коллекторной пластины и в расчет принимается сопротивление только переходного слоя $r_n = R$ между щеткой и коллекторной пластиной. Тогда ток I_a от щетки переходит в коллекторную пластину I и делится на два равных тока $i = 0,5I_a$. На рис. 4-14 показано, что в секции, включенной в параллельную ветвь,

идущую влево, проходит ток $i_c = 0,5 I_a$ в направлении, обратном движению стрелки часов.

В следующий момент времени, когда коллекторная пластина 6 коснется щетки, ток I_a будет делиться по-иному. Если, например, через промежуток времени $t = 0,1 T$ щетка касается одной десятой своей контактной поверхности пластины 6, то через эту пластину проходит ток $i_6 = 0,1 I_a$, а через пластину 1 — ток $i_1 = 0,9 I_a$. Токи в параллельных ветвях по-прежнему должны быть неизменны и равны $i_a = 0,5 I_a$, если $I_a = \text{const}$. Тогда, имея прежнее

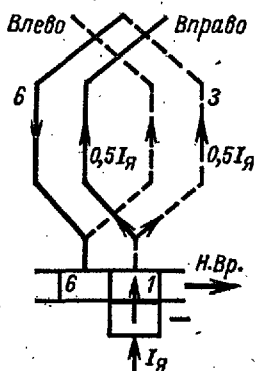


Рис. 4-14. Начало коммутации ($t = 0$).

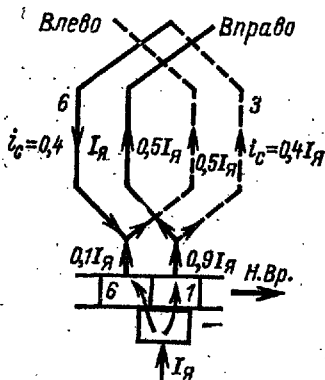


Рис. 4-15. Коммутация при $t = 0,1 T$.

направление, ток секции $i_c = i_1 - i_a = (0,9 - 0,5) I_a = 0,4 I_a$, а ток другой параллельной ветви $i_a = i_6 + i_c = (0,1 + 0,4) I_a = 0,5 I_a$. Секция в рассмотренный момент времени показана на рис. 4-15.

Если рассмотреть положение в момент, когда $t = 0,5 T$, то окажется, что ток секции $i_c = 0$, а токи в параллельных ветвях по-прежнему $i_a = 0,5 I_a$. В дальнейшем ток секции начнет нарастать в обратном направлении и при $t = T$ он будет равен $i_c = 0,5 I_a$. Секция переключена в другую параллельную ветвь, и коммутация закончена (рис. 4-16). Зависимость изменения тока i_c от времени t показана на рис. 4-17 и представляет собой прямую линию. Коммутация в этом случае называется **прямолинейной** и ее всегда стремятся получить такой при конструировании машины.

Однако практически время коммутации T ничтожно, ток секции i_c быстро меняется, и в ней наводится э. д. с.

самоиндукции e_s . Зависимость $i_c = f(t)$ — прямая линия, т. е. $di_c/dt = \operatorname{tg} \alpha = \operatorname{const}$. Следовательно, $e_s = -L_c di_c/dt$ — постоянная величина, а добавочный ток в секции, ею вызванный,

$$i_s = \frac{e_s}{r_n} = \frac{e_s}{r_6 + r_1},$$

где r_6 и r_1 — сопротивления переходного слоя между щеткой и соответствующей коллекторной пластиной. Вычисляя для различных значений t величину r_n , можно найти

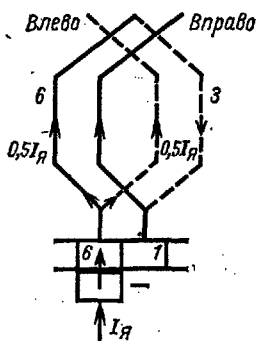


Рис. 4-16. Конец коммутации ($t = T$)

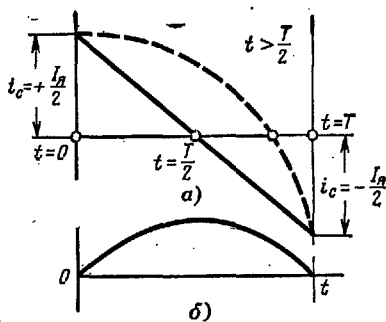


Рис. 4-17. График изменения тока в коммутационной секции при естественных условиях.

ток i_s . Величина r_n для $t = T/2$, например, равна $r_6 + r_1 = 2R + 2R = 4R$, а для $t = 0$ и $t = T$ она равна бесконечности. Зависимость тока i_s от времени t показана на рис. 4-17, б. Суммарный ток $i_c + i_s$ представлен на рис. 4-17, а пунктирной кривой, по которой можно видеть, что при наличии e_s суммарный ток секции переходит через нуль позже, чем следует ($t > T/2$). Такая коммутация называется **з а м е д л е н н о й**.

При замедленной коммутации плотность тока на сбегавшем крае щетки сильно увеличивается (рис. 4-18), вызывая излишний, сверх расчетного, нагрев щетки и ускоренный износ ее. Однако главная опасность состоит в том, что при замедленной коммутации наблюдается искрение между коллектором и сбегавшим краем щетки. Оно возникает потому, что при размыкании секции запасенная ею электромагнитная энергия $L_c i_s^2/2$ выделяется в электрической дуге сбегавшего края щетки.

Если благодаря поперечной реакции якоря индукция B_δ под краем полюса увеличивается на 30—50%, то между коллекторными пластинами секции, перемещающейся в зоне повышенной индукции, возникает разность потенциалов, превышающая 25—35 В. Этим напряжением поддерживаются отдельные электрические дуги, которые, сливаясь в ионизированном пространстве вокруг коллектора, могут образовать мощную дугу, перекрывающую траверсы щеток разной полярности. Это называется **к р у г о в ы м о г н е м** по коллектору и вызывает серьезную аварию.

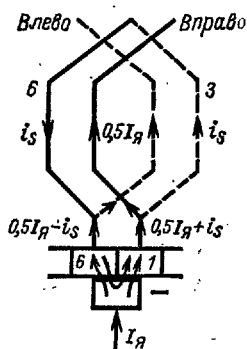


Рис. 4-18. Замедленная коммутация.

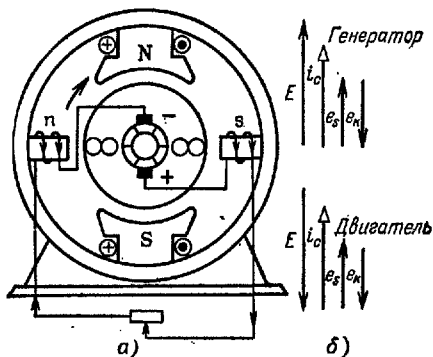


Рис. 4-19. Дополнительные полюсы.

Для улучшения коммутации принимаются меры, которые сводятся к уменьшению добавочного тока i_s . Одной из самых радикальных мер является применение дополнительных полюсов.

На рис. 4-19 показан двухполюсный генератор, имеющий, кроме главных полюсов N и S , два дополнительных полюса n и s , расположенных по геометрической нейтрали и чередующихся, как показано, в направлении вращения якоря. Обмотка возбуждения дополнительных полюсов соединена последовательно с якорем. В двух секциях, показанных на рисунке кружками, происходит коммутация. Электродвижущая сила машины E и уменьшающийся ток секции i_c направлены в одну сторону; в эту же сторону направлена и э. д. с. самоиндукции e_s , поддерживающая убывающий ток (рис. 4-19, б). При указанной на рис. 4-19, а полярности дополнительных полюсов, в активных сторонах секции наводится дополнительная э. д. с. коммута-

ции e_k , направление которой встречно E , а значит, и e_s . Если e_k численно равно e_s , то дополнительный ток секции

$$i_s = \frac{e_s - e_k}{r_n} = 0.$$

При работе машины электродвигателем чередованием главных полюсов с дополнительными по направлению вращения будет $NnSs$.

Так как э. д. с. e_s пропорциональна току якоря I_a , то для автоматической компенсации ее при всех нагрузках дополнительные полюсы делаются ненасыщенными. Тогда э. д. с. $e_k \equiv \Phi_{d, n} \equiv I_a$.

Для проверки допустимой коммутации «на глаз» установлены следующие степени искрения на коллекторе:

Степень 1 — отсутствие искр (темная коммутация).

Степень $1^{1/4}$ — слабое точечное искрение под небольшой частью щетки. В этих случаях нет почернения коллектора и нагара на щетках.

Степень $1^{1/2}$ — слабое искрение под большей частью щетки. При этом появляются следы почернения на коллекторе, легко устранимые протиранием поверхности коллектора тряпкой, смоченной в бензине, а также следы нагара на щетках.

4-10. Понятие о номинальных данных и характеристиках электрических машин

Каждая электрическая машина снабжается заводским техническим паспортом или небольшой табличкой, укрепленной на корпусе, где указываются ее тип или серия, год выпуска, номер и основные номинальные величины — мощность, напряжение, ток, частота вращения и др.

Знание этих номинальных величин необходимо для правильной технической эксплуатации, обеспечивающей надежную работу в пределах установленного срока (примерно 10 лет для стационарных машин, работающих в условиях нормальной окружающей среды).

Основные величины могут быть при необходимости выражены в относительных величинах или в процентах номинальных.

Например, относительная мощность

$$P_* = \frac{P}{P_n}; \quad \text{ток} \quad I_* = \frac{I}{I_n};$$

напряжение $U_* = U/U_n$; момент $M_* = M/M_n$; частота вращения $n_* = n/n_n$ и т. д., где P_n , I_n , U_n и n_n — номинальные величины, указанные в паспорте. В процентах эти величины выразятся:

$$P\% = P_* \cdot 100; \quad I\% = I_* \cdot 100; \quad U\% = U_* \cdot 100; \quad n\% = n_* \cdot 100.$$

В условиях эксплуатации важно знать основные характеристики машины, выражающие зависимость одних переменных величин от других. Например, зависимость напряжения на зажимах генератора от его нагрузки (тока в цепи) при постоянной частоте вращения $n = \text{const}$ и токе в обмотке возбуждения $I_v = \text{const}$ называется внешней характеристикой генератора $U = f(I)$.

Зависимость частоты вращения электродвигателя n от механической нагрузки на его валу (мощности P_2 или момента M) при постоянном напряжении на зажимах якоря $U = \text{const}$ и постоянном токе в обмотке возбуждения $I_v = \text{const}$ называется механической характеристикой электродвигателя.

Эти характеристики обычно изображают графически в виде кривых, построенных в двух осях, на которых откладывают абсолютные или относительные величины.

4-11. Генератор с независимым возбуждением

Генератором с независимым возбуждением называется такой, обмотка возбуждения которого присоединяется к постороннему источнику питания. На рис. 4-20 показана схема генератора независимого возбуждения. К рубильнику 1 подключена обмотка возбуждения 4 последовательно с регулировочным реостатом 2 и амперметром, измеряющим ток I_v . Реостат имеет холостой контакт 3, присоединяемый к зажиму обмотки возбуждения, подключенному непосредственно ко второму зажиму рубильника. Если для уменьшения тока возбуждения передвигать движок вверх (рис. 4-20), то он попадет на холостой контакт и замкнет обмотку возбуждения накоротко. Разрыва цепи возбуждения при этом не происходит. Если же схема собрана так, что обмотка возбуждения размыкается, то в месте разрыва образуется электрическая дуга и энергия магнитного поля превращается в электрическую. Индуктивность обмотки обычно велика и, следовательно, велика э. д. с. самоиндукции, поддерживающая на концах разомкнутой обмотки значительное напряжение, что мо-

жет быть причиной пробоя изоляции обмотки и большой опасности для обслуживающего персонала. Электрическая дуга, температура которой достигает $4\,000^\circ\text{C}$, вызывает оплавление и повышенное окисление поверхности контактов.

К зажимам якоря присоединен потребитель энергии r , а для измерения напряжения U и тока $I = I_a$ — вольтметр и амперметр. Первичный двигатель, вращающий якорь, не показан.

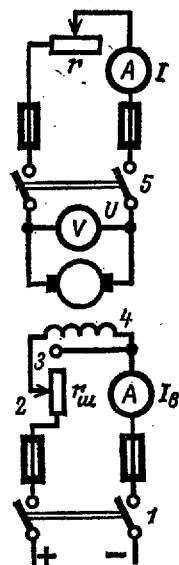


Рис. 4-20. Схема генератора независимого возбуждения.

Характеристика холостого хода $E_0 = f(I_b)$ при $n = \text{const}$ и $I = 0$ представляет собой в другом масштабе график $\Phi = f(I_b)$, так как E пропорциональна Φ . Она служит для проверки расчетных данных магнитной цепи, графических построений и называется магнитной характеристикой машины.

Получают ее следующим образом. Якорь генератора вращают с постоянной скоростью $n = n_n$ при разомкнутых рубильниках 1 и 5. Затем, включив рубильник 1, уменьшая сопротивление $r_{ш}$, увеличивают напряжение генератора до величины $U_0 = (1,1 \div 1,2)U_n$. Записав значения I_b и U_0 , уменьшают ток возбуждения, делая 5—6 измерений I_b и U_0 . Последнее измерение производится при токе $I_b = 0$. Полученная при этом э. д. с., наведенная потоком остаточной индукции, называется остаточной $E_{\text{ост}}$ и равна (2—2,5%) U_n . Точка, соответствующая номинальному напряжению U_n , лежит обычно на колене кривой — при токе $I_{b,x}$, называемом током возбуждения при холостом ходе и номинальном напряжении (рис. 4-21).

Внешняя характеристика генератора $U = f(I)$ при $I_b = \text{const}$ и $n = \text{const}$ характеризует устойчивость напряжения генератора при изменении нагрузки и показана на рис. 4-22 (кривая 1).

Для получения характеристики якорь вращают с постоянной скоростью $n = n_n$ и возбуждают машину при холостом ходе до $U = (1,1 \div 1,2)U_n$. Замкнув рубильник 5 (рис. 4-20), уменьшают постепенно сопротивление нагрузки

r , регулируют одновременно ток возбуждения так, чтобы при $I = I_n$ установилось номинальное напряжение U_n . Это будет первая точка характеристики при U_n и I_n (рис. 4-22). Затем, поддерживая неизменным I_n и n , увеличивают постепенно сопротивление r , и измеряют 5—6 раз значения U и I , разгружая генератор до холостого хода.

При разгрузке уменьшается ток I , уменьшаются падение напряжения в цепи якоря $I r_a$ и размагничивающее

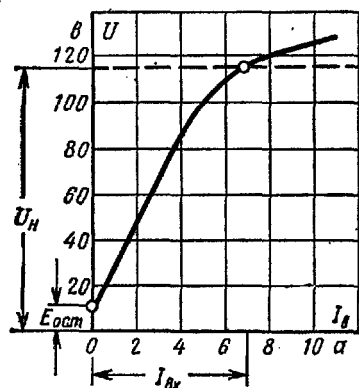


Рис. 4-21. Характеристика холостого хода генератора.

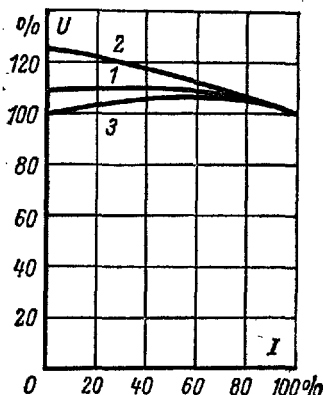


Рис. 4-22. Внешние характеристики генератора.

действие реакции якоря (см. § 4-8). Поток Φ машины возрастает, а с ним и э. д. с. E . Так как $U = E - I r_a$, то напряжение машины U растет.

Величина

$$\Delta U\% = \frac{U_0 - U_n}{U_n} 100\% \quad (4-13)$$

называется процентным изменением напряжения и составляет для генераторов с независимым возбуждением 5—10%. Для поддержания напряжения неизменным при колебаниях нагрузки приходится регулировать ток возбуждения. Это может быть сделано вручную или при помощи автоматических регуляторов.

4-12. Генератор с параллельным возбуждением

У генератора с параллельным возбуждением обмотка возбуждения присоединяется к зажимам якоря параллельно цепи нагрузки (рис. 4-23). Ток якоря $I_a = I + I_b$, где $I_b = (2 \div 3\%) I_n$.

Для возбуждения этого генератора необходимо, чтобы магнитный поток, создаваемый током возбуждения, совпадал по направлению с потоком остаточной индукции. Только в этом случае ток в обмотке возбуждения, созданный остаточной э. д. с. $E_{ост}$, подмагничивает машину, магнитный поток генератора нарастает и э. д. с. увеличивается. Последнее вызывает новое увеличение $I_{в}$, а следовательно, и потока Φ . Этот процесс самовозбуждения идет до тех пор, пока э. д. с. не становится равной падению напряжения в обмотке возбуждения, т. е.

$$E = I_{в} r_{в}.$$

Если оказывается, что генератор не возбуждается, то необходимо изменить направление тока $I_{в}$ в обмотке возбуждения. Характеристика холостого хода генератора имеет вид, показанный выше для генератора независимого возбуждения и имеет то же назначение.

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения $U = f(I)$ при $n = \text{const}$ и $r_{в} = \text{const}$ получается так же, как и для генератора с независимым возбуждением и имеет такой же вид (кривая 2

на рис. 4-22). Однако процентное изменение напряжения $\Delta U \%$ здесь получается большим и достигает 30%. Причина в том, что обмотка возбуждения этого генератора присоединена к зажимам якоря. При сбросе нагрузки напряжение растет, растет и ток возбуждения $I_{в} = U/r_{в}$. Поэтому магнитный поток и э. д. с. E машины увеличиваются быстрее, чем в машине независимого возбуждения.

4-13. Генератор со смешанным возбуждением

На рис. 4-24 показана схема генератора со смешанным возбуждением. Он имеет две обмотки возбуждения: параллельную (шунтовую) и последовательную (серийную), включенную последовательно с якорем. При таком включении ток последовательной обмотки создает свою м. д. с. $F_{м.с.}$, которая может складываться с м. д. с. параллельной обмотки $F_{м.ш}$ или из нее вычитаться, т. е. $F_{м} =$

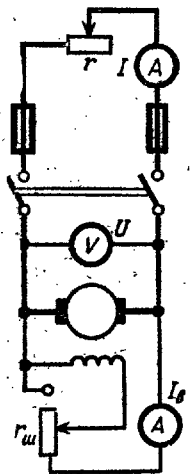


Рис. 4-23. Генератор параллельного возбуждения.

$= F_{м.ш} \pm F_{м.с}$. В практике применяется согласное соединение обмоток возбуждения, при котором м. д. с. складываются и с увеличением нагрузки генератор автоматически подмагничивается. Размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения $I r_a$ компенсируются и напряжение такого генератора при колебаниях нагрузки практически неизменно (рис. 4-22, кривая 3).

4-14. Электродвигатели постоянного тока

Изобретение электродвигателя постоянного тока относится к 1834 г. и было сделано Б. С. Якоби.

Так как одна и та же машина может работать в режиме генератора или двигателя, то естественно, что падение напряжения в обмотке якоря при номинальном токе у нее будет одно и то же. Это падение напряжения $I_n r_a = (4 \div 10) \% U_n$. Следовательно, если к зажимам неподвижного якоря приложить напряжение $U = U_n$, то его ток будет в 25—10 раз больше I_n .

На такой ток не рассчитаны ни обмотка якоря, ни его щетки и коллектор. Поэтому напряжение на зажимах якоря при пуске с номинальным током должно быть понижено на $(96-90) \% U_n$ включением реостата r_p последовательно с якорем. Реостат, предназначенный для ограничения и регулирования пускового тока, называется пусковым реостатом. Для удешевления реостата считают возможным пускать двигатель с пусковым током, равным $(1,5 \div 2,0) I_n$. Тогда пусковой ток

$$I_n = \frac{U_n}{r_a + r_p} \quad (4-14)$$

откуда можно подсчитать сопротивление r_p .

При вращении якоря в его обмотке наводится противо-э. д. с. и ток якоря

$$I_a = \frac{U - E}{r_a + r_p}$$

по мере нарастания скорости уменьшается. Надобность

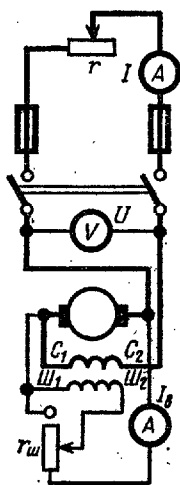


Рис. 4-24. Генератор смешанного возбуждения.

в реостате постепенно отпадает, и его сопротивление ступенями уменьшается до нуля. Тогда ток

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{r_{\text{я}}}. \quad (4-14a)$$

Если двигатель вращается вхолостую, то противо-э. д. с. достигает 99% $U_{\text{н}}$ при токе холостого хода $I_{\text{я}} = I_{\text{x}} \approx (5 \div 10\%)I_{\text{н}}$. При нагрузке на валу, если ток $I_{\text{я}} = I_{\text{н}}$, противо-э. д. с. составляет $(96 \div 90\%)U_{\text{н}}$.

Частоту вращения двигателя можно подсчитать, воспользовавшись формулой (4-7):

$$n = \frac{1}{c_E} \frac{E}{\Phi}. \quad (4-15)$$

Таким образом частота вращения пропорциональна наводимой в обмотке якоря э. д. с. и обратно пропорциональна магнитному потоку Φ . Так как $E = U - I_{\text{я}}r_{\text{я}}$, то

$$n = \frac{1}{c_E} \frac{U - I_{\text{я}}r_{\text{я}}}{\Phi}. \quad (4-16)$$

С увеличением нагрузки на валу, т. е. мощности на выходе P_2 , мощность на зажимах электродвигателя, т. е. мощность на входе P_1 растет. Тогда при $U = \text{const}$ обязательно растет ток $I_{\text{я}}$. По формуле (4-16) можно видеть, что скорость двигателя должна уменьшаться. С другой стороны, с увеличением тока $I_{\text{я}}$ возрастает размагничивающее действие реакции якоря, отчего скорость должна увеличиваться. Для устойчивой работы двигателя его конструируют так, что влияние падения напряжения $I_{\text{я}}r_{\text{я}}$ всегда больше влияния реакции якоря и скорость с увеличением нагрузки обычно несколько уменьшается.

Вращающий момент двигателя и электромагнитная мощность, развиваемая им с учетом потерь на трение, в соответствии с формулами (4-8) и (4-12) могут быть выражены в виде

$$M = c_M I_{\text{я}} \Phi$$

$$\text{и} \quad P_{\text{эм}} = EI_{\text{я}} = c_E I_{\text{я}} \Phi n.$$

С увеличением тормозного момента M_2 на валу момент вращения M автоматически увеличивается за счет роста тока $I_{\text{я}}$ до тех пор, пока при определенном n не наступает равенство моментов $M = M_2$. Таким образом, каждой нагрузке соответствует определенная частота вращения.

По своим эксплуатационным свойствам электродвигатели, как и генераторы, делятся на четыре типа: с парал-

лельным, независимым, последовательным и смешанным возбуждением. Если в генераторах интересуются главным образом их электрическими свойствами, то в двигателях рассматривают их механические свойства, например: $n = f(I)$; $n = f(I_{\text{в}})$; $M = f(I)$ и др.

4-15. Электродвигатель с параллельным возбуждением

Двигатель с параллельным возбуждением является наилучшим среди двигателей постоянного тока для привода механизмов, требующих почти постоянной частоты вращения и в то же время экономичного регулирования скорости. Схема этого двигателя показана на рис. 4-25.

Зажимы пускового реостата обозначаются: L — присоединяемый к линии (питающей сети); M — к зажимам обмотки возбуждения и $Я$ — к зажимам якоря. Черными кружками (рис. 4-25) обозначены рабочие контакты, а пропуски между ними соответствуют секциям сопротивлений реостата. Металлическая дуга 3 при работе двигателя постоянно соединяет зажим L с зажимами шунтового реостата, регулирующего ток возбуждения $I_{\text{в}}$. Перед замыканием рубильника необходимо убедиться, что рычаг (подвижный контакт) 1 пускового реостата 2 стоит на холостом контакте 0. Подвижный контакт шунтового реостата в цепи возбуждения должен находиться в крайнем левом положении, при котором сопротивление реостата минимально.

При замыкании рубильника и переводе рычага пускового реостата на первый из рабочих контактов ток I двигателя разветвляется на ток якоря $I_{\text{я}}$ и ток обмотки возбуждения $I_{\text{в}}$.

Таким образом, ток в питающей цепи

$$I = I_{\text{я}} + I_{\text{в}}, \quad (4-17)$$

где $I_{\text{в}} = (1 \div 7) \% I_{\text{н}}$.

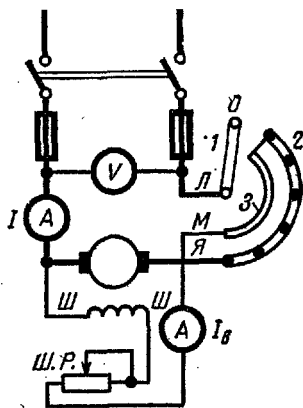


Рис. 4-25. Двигатель параллельного возбуждения.

Первый бросок тока в зависимости от величины пускового сопротивления $I_n = (1,5 \div 2,0) I_n$. Под действием начального вращающего момента якорь начинает вращаться и с нарастанием скорости ток якоря уменьшается. Тогда рычаг пускового реостата может быть переведен на второй контакт. При этом ток якоря, увеличившись броском, вызовет увеличение вращающего момента и дальнейшее приращение скорости, а затем вновь начинает уменьшаться. Тогда рычаг реостата переводят на следующий контакт и т. д. Пуск заканчивается, когда все сопротивление

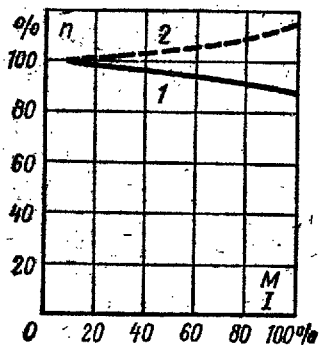


Рис. 4-26. Скоростные характеристики двигателя при параллельном возбуждении.

тока машины Φ и противо-э. д. с. будут максимальны. Кроме того, электродвигатель при пуске должен развивать повышенный вращающий момент, а это может быть также при наибольшем магнитном потоке [формула (4-8)].

Перед отключением двигателя переводят рычаг пускового реостата на нулевой контакт, а затем размыкают рубильник. Этим исключается подгорание контактов рубильника.

Скоростная характеристика двигателя $n = f(I)$ при $U = \text{const}$ и $I_n = \text{const}$ показана на рис. 4-26 кривой 1. При отсутствии механической нагрузки ток холостого хода $I_x < 10\% I_n$ и скорость наибольшая:

$$n_x = \frac{1}{c_E} \frac{U - I_x r_a}{\Phi} \approx \frac{1}{c_E} \frac{U}{\Phi}, \quad (4-18)$$

так как $I_x r_a \approx 0$.

При увеличении нагрузки (момента сопротивления) на валу двигателя частота вращения падает незначительно,

так как автоматическое увеличение вращающего момента происходит за счёт увеличения тока в цепи якоря I_a , который согласно уравнению (4-14а) резко возрастает при незначительном уменьшении противо-э. д. с. вследствие малой величины сопротивления цепи якоря r_a . Такая характеристика называется ж е с т к о й.

При неизменном токе возбуждения магнитный поток Φ можно считать приблизительно постоянным, так как влияние реакции якоря незначительно.

Тогда вращающий момент двигателя

$$M = c_M I \Phi \approx (c_M \Phi) I \quad (4-19)$$

приблизительно пропорционален току I . Поэтому если отложить M по оси абсцисс на рис. 4-26, то получится механическая характеристика двигателя, т. е.

$$n = f(M)$$

при $U = \text{const}$ и $I_b = \text{const}$.

Очень удобны для пользования рабочие характеристики (рис. 4-27), даваемые в каталогах и описаниях электродвигателя. Это

$$n, M, I, \eta = f(P_2)$$

при U_n и $I_b = \text{const}$, где η — к. п. д. двигателя, а P_2 — полезная мощность на валу.

Развиваемая на валу мощность двигателя

$$P_2 = \frac{M \cdot 2\pi n}{60},$$

а вращающий момент

$$M = \frac{P_2 \cdot 60}{2\pi n}. \quad (4-20)$$

При неизменной частоте вращения зависимость $M = f(P_2)$ была бы прямой линией, проходящей через начало координат. Однако скорость n при увеличении P_2 падает и момент не пропорционален P_2 . Ток I при неизменном U пропорционален мощности в цепи питания $P_1 = UI$. Так как потери двигателя $P_1 - P_2$ малы, то ток I приблизительно пропорционален P_2 .

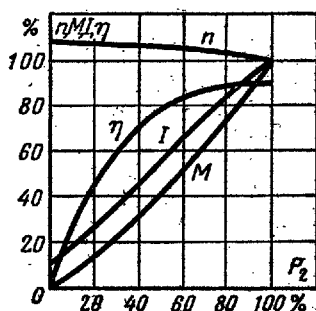


Рис. 4-27. Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения.

Регулирование скорости двигателя с параллельным возбуждением обычно производится изменением тока возбуждения. Этот способ дает экономичное плавное регулирование в пределах 1 : 1,5, а в специальном исполнении — до 1 : 8. Регулирование происходит следующим образом. Вращающий момент двигателя $M = c_M I \Phi$, при $\Phi = \text{const}$ пропорционален току I , а ток

$$I = \frac{U - E}{r_{\text{я}}}.$$

Вследствие малой величины $r_{\text{я}}$ падение напряжения в цепи якоря $I_{\text{я}} r_{\text{я}}$ невелико. Поэтому при постоянных значениях U и $r_{\text{я}}$ ток якоря может значительно возрасти при небольшом уменьшении противо-э. д. с.

Например, при $r_{\text{я}} = 0,5$ Ом и $U = 220$ В при токе якоря $I_{\text{я}} = 10$ А противо-э. д. с. $E = U - I_{\text{я}} r_{\text{я}} = 220 - 10,05 \approx 215$ В. Если противо-э. д. с. уменьшится всего на 10 В (примерно на 5%) и будет $E' = 205$ В, то ток якоря станет $I'_{\text{я}} = \frac{220 - 205}{0,5} = 30$ А, т. е. увеличится в 3 раза.

Таким образом, если при некоторой постоянной нагрузке ($M_{\text{вр}} = M_{\text{т}}$) и частоте вращения уменьшить ток возбуждения например на 5%, то на столько же сразу уменьшатся магнитный поток Φ и противо-э. д. с. E . Это вызовет резкое увеличение тока якоря и вращающего момента, причем избыточный момент пойдет на ускорение вращения якоря. Однако по мере нарастания скорости якоря противо-э. д. с. снова увеличится, ток якоря уменьшится до величины, при которой вращающий момент $M = c_M \Phi I_{\text{я}}$ примет прежнее значение. Таким образом, при равенстве $M_{\text{вр}} = M_{\text{т}}$ установится новая постоянная частота вращения, большая прежней.

При таком способе регулирования потери энергии в регулировочном реостате (мощность потерь $P_{\text{рег}} = I_{\text{я}}^2 r_{\text{я}}$) очень малы, так как $I_{\text{я}}$ составляет всего $(2 \div 5\%) I_{\text{н}}$.

Этот способ позволяет изменять частоту вращения двигателя в сторону ее увеличения выше номинальной.

Если при неизменной нагрузке на валу двигателя включить добавочное сопротивление $r_{\text{д}}$ последовательно с обмоткой якоря, то в первый момент ток якоря уменьшится, отчего уменьшится вращающий момент и, так как момент сопротивления окажется больше, скорость уменьшится. Однако вследствие уменьшения скорости и противо-э. д. с. ток якоря станет возрастать, будет возрастать вращающий

момент и при равенстве моментов дальнейшее снижение скорости прекратится. Двигатель будет продолжать работать с постоянной, но пониженной частотой вращения. Этот способ регулирования неэкономичен вследствие значительных потерь энергии в сопротивлении реостата.

4-16. Электродвигатель с независимым возбуждением

Электродвигатель с независимым возбуждением по своим свойствам вполне подобен двигателю с параллельным возбуждением. Однако вследствие того что обмотки возбуждения и якоря питаются от отдельных источников тока, а не от общей сети, получается возможность экономичного и широкого регулирования скорости изменением величины напряжения на зажимах якоря и безреостатного пуска.

На рис. 4-28 показана одна из возможных схем работы двигателя с независимым возбуждением. На этой схеме,

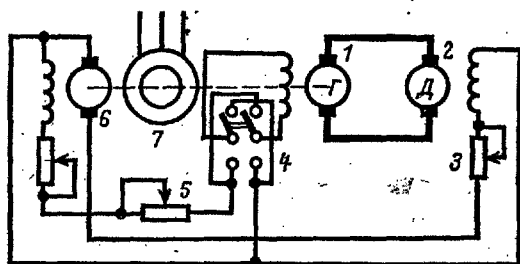


Рис. 4-28. Схема генератор-электродвигатель.

называемой *генератор—двигатель* (Г—Д), якорь двигателя 2 присоединяется без пускового реостата к якорю генератора 1, предназначенного для питания этого двигателя. Генератор и двигатель имеют независимое возбуждение, подаваемое от специального генератора 6, называемого *возбудителем*. Генератор 1 и возбудитель 6 приводятся во вращение, как правило, асинхронным электродвигателем 7.

Частоту вращения двигателя 2 можно изменять, регулируя его ток возбуждения реостатом 3 и изменением напряжения U генератора 1, меняя его ток возбуждения реостатом 5. Изменяя направление тока возбуждения генератора 1, переключателем 4 можно изменять полярность ще-

ток генератора, а значит, и направление вращения двигателя 2, приводящего во вращение производственный механизм.

Эта схема применяется в шахтных грузоподъемных установках, для привода гребных винтов на судах, на прокатных станах и для привода некоторых металлорежущих станков. Механические характеристики этого агрегата (рис. 4-29) вполне подобны показанной на рис. 4-26. Кривая 1 представляет собой естественную характеристику, которая получилась бы при номинальном напряжении, так как

$$n = \frac{1}{c_E} = \frac{U - I r_a}{\Phi},$$

то

$$n_0 = \frac{1}{c_E} \frac{U}{\Phi}.$$

Рис. 4-29. Механические характеристики приводного двигателя по системе генератор-электродвигатель.

$n = f(M)$, расположенных ниже характеристики 1; при уменьшении тока возбуждения двигателя характеристики располагаются выше Φ . Все эти характеристики параллельны друг другу; почти прямолинейны и остаются жесткими при регулировании, что необходимо в частности для привода металлорежущих станков. Пределы регулирования скорости примерно 1 : 20.

4-17. Электродвигатели с последовательным и со смешанным возбуждением

Электродвигатель с последовательным возбуждением имеет применение в качестве пускового для запуска автомобиля (стартера), в некоторых крановых устройствах и в мощных экскаваторах. Во всех этих устройствах допустимо значительное изменение частоты вращения при изменении тормозного момента на валу. Характеристики $M = f(P_2)$ и $n = f(P_2)$ при $U = \text{const}$ этого двигателя показаны на рис. 4-30, а схема его включения — на рис. 4-31.

Обмотка возбуждения двигателя соединяется последовательно с обмоткой якоря и ее сопротивление r_c такого же порядка, как и r_a , т. е. невелико. Поэтому пусковой рео-

стат в схеме так же необходим, как и в других двигателях постоянного тока.

Ток двигателя при работе равен:

$$I = \frac{U - E}{r_a + r_c} \quad (4-21)$$

При малых токах [около (25—50%) I_n] поток машины пропорционален току ($\Phi \equiv I$) и

$$M = c_M I \Phi = c_M I I = c_M I^2, \quad (4-22)$$

т. е. момент пропорционален квадрату тока. При больших нагрузках на валу ток I близок к I_n , сердечник машины насыщается и момент становится пропорционален току I .

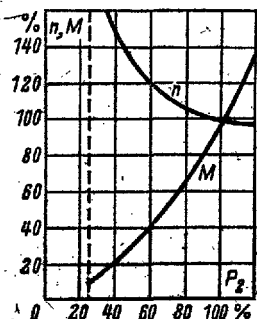


Рис. 4-30. Характеристики скорости и момента двигателя последовательного возбуждения.

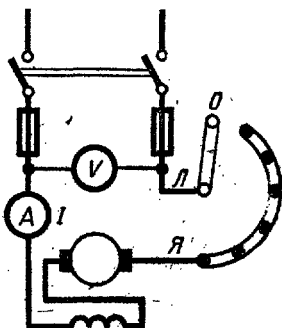


Рис. 4-31. Схема двигателя последовательного возбуждения.

Частота вращения двигателя

$$n = \frac{1}{c_E} \frac{U - I(r_a + r_c)}{\Phi} \quad (4-23)$$

с увеличением нагрузки резко падает, так как одновременно увеличиваются Φ и $I(r_a + r_c)$. Такая характеристика называется мягкой.

При нагрузках, меньших (25—30%) $P_{2н}$, электродвигатель вращается с недопустимо большой скоростью вследствие малого значения магнитного потока. Такой режим не допускается ввиду опасности механического повреждения якоря.

Электродвигатель со смешанным возбуждением, имеющий последовательную и параллельную обмотки возбуж-

дения, расположенные на общих полюсах, обладает частично свойствами двигателей параллельного и последовательного возбуждения. Обе обмотки соединяются так, чтобы их м. д. с., а значит, и потоки $\Phi_{ш}$ и Φ_c складывались. Такое соединение называется с о г л а с н ы м.

Тогда

$$n = \frac{1}{c_E} \frac{U - I_{я}(r_{я} + r_c)}{\Phi_{ш} + \Phi_c}; \quad (4-24)$$

$$M = c_M I_{я} (\Phi_{ш} + \Phi_c). \quad (4-25)$$

Электродвигатели этого вида применяются, когда скоростная характеристика должна быть несколько более жесткой, чем у двигателей с последовательным возбуждением. Они применяются как приводные двигатели трамвая, метро, электровоза, электропоезда, для электроприводов с использованием маховиков (ножницы, прессы и др.). Энергия вращающегося маховика может быть использована для привода механизма только при уменьшении его скорости. При ударной нагрузке электродвигатель с мягкой характеристикой стремится снизить скорость, благодаря чему запасенная маховиком кинетическая энергия передается исполнительному механизму. Работа с маховиком позволяет подобрать электродвигатель на меньшую мощность.

Второй случай применения последовательной обмотки это в двигателях параллельного возбуждения с малым воздушным зазором между якорем и полюсами и большой величиной тока якоря, приходящейся на единицу окружности якоря. В таких двигателях размагничивающее действие реакции якоря на частоту вращения больше, чем влияние падения напряжения в якоре [формула (4-19)]. Скорость такого двигателя с увеличением нагрузки не падает, а нарастает (рис. 4-26, кривая 2), что недопустимо. Если двигатель снабдить дополнительной последовательной (с т а б и л и з и р у ю щ е й) обмоткой, то работа его станет более устойчивой.

4-18. Потери и коэффициент полезного действия

Часть подведенной к электрической машине энергии не может быть полезно использована в машине и рассеивается в виде тепла в окружающее пространство. Эту часть энергии называют потерями.

Потери в стали $P_{ст}$ или магнитные возникают в теле якоря и полюсных наконечников при перемагничивании от гистерезиса и вихревых токов. Мощность этих потерь зависит от частоты перемагничивания $f = pn/60$ и максимального значения магнитной индукции B_m .

Потери механические $P_{мех}$ получаются в подшипниках при трении вращающихся частей о воздух и трении щеток о коллектор. Мощность механических потерь пропорциональна частоте вращения машины n . Если частота вращения n и ток возбуждения I_v неизменны, то потери $P_{ст} + P_{мех}$ постоянны. Они называются потерями холостого хода P_x .

Потери электрические возникают при прохождении тока по обмотке якоря и переходному контакту между щетками и коллектором, а также во всех обмотках возбуждения и дополнительных полюсов:

$$P_{э} = I_a^2 r_a + P_{щ} + I_a^2 r_{дп} + I_a^2 r_c + U_v I_v.$$

Потери в щеточном контакте $P_{щ} = \Delta U_{щ} I_a$ определяются по падению напряжения $\Delta U_{щ}$, которое принимается: 2 В — для угольных, графитных и электрографитированных щеток и 0,6 В для медно-графитных щеток.

Потери добавочные $P_{доб}$ в обмотке и стали якоря вызываются искажением магнитного поля реакцией якоря и полями, возникающими вокруг секций, в которых происходит коммутация. Эти потери оцениваются от 0,01 до 0,005 $U_n I_n$ и считаются пропорциональными I_a^2 .

Коэффициентом полезного действия электрической машины называется отношение полезной мощности P_2 к затраченной (полной) мощности P_1 . Тогда для генератора

$$\eta_g = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI}{UI + (P_{ст} + P_{мех} + P_{э} + P_{доб})} 100\%. \quad (4-26)$$

Для электродвигателя

$$\eta_{дв} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI - (P_{ст} + P_{мех} + P_{э} + P_{доб})}{UI} 100\%. \quad (4-27)$$

График изменения к. п. д. в зависимости от полезной мощности P_2 показан на рис. 4-27. Когда полезная мощность мала и потери холостого хода P_x сравнимы с ней, то к. п. д. мал. С ростом полезной мощности к. п. д. быстро нарастает, так как потери холостого хода постоянны. При увеличении нагрузки электрические потери $P_{э}$ возрастают пропор-

ционально квадрату тока и рост к. п. д. замедляется. Наибольшее значение к. п. д. обычно наступает при $(75 \div 100\%)P_n$ и равно 70—93%. Большие цифры относятся к более мощным машинам.

4-19. Лабораторная работа. Электродвигатель с параллельным возбуждением

Перед выполнением работы ознакомиться с содержанием § 4-14 и 4-15.

П л а н р а б о т ы

1. Записать основные технические данные двигателя. Подобрать по этим данным измерительную и вспомогательную аппаратуру и записать ее технические данные.
2. Собрать схему (рис. 4-25) и показать ее руководителю.
3. Произвести пуск двигателя. Заметить его направление вращения. Остановить двигатель.
4. Изменить направление вращения двигателя:
 - а) путем изменения направления тока в обмотке возбуждения;
 - б) путем изменения направления тока в обмотке якоря.
5. Пустить двигатель и при номинальном напряжении и номинальном токе возбуждения менять нагрузку двигателя от нуля до номинальной, изменяя натяжение тормозной ленты тормоза (рис. 4-32).

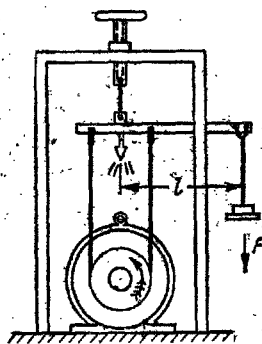


Рис. 4-32. Тормозное устройство для двигателя.

При различных нагрузках записать в табл. 4-1 U ; I ; I_n ; n и F ; здесь F — сила, приложенная на конце плеча l ; m , удерживающая рычаг ab в горизонтальном положении.

6. По полученным данным определить:
 - а) вращающий момент двигателя

$$M = Fl, \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- б) мощность, развиваемую двигателем на валу,

$$P_2 = M\omega,$$

где $\omega = \pi n / 30$;

- в) к. п. д. двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%.$$

7. По данным наблюдений и расчетов построить рабочие характеристики двигателя: n ; I ; M ; $\eta = f(P_2)$ при $U = \text{const}$ и $I_n = \text{const}$.

8. При номинальном напряжении изменять нагрузку двигателя от нуля до номинальной, регулируя ток возбуждения так, чтобы частота вращения оставалась неизменной.

9. Дать заключение о проделанной работе.

Таблица 4-1

№ наблюдений	Из наблюдений						Из подсчетов				Примечание
	U	I	I_B	n	F	$I -$	M	$P_1 = UI$	P_2	η	
	В	А	А	об/мин	Н	м	Н · м	Вт	Вт	%	
	—	%	—	%	—	—	%	%	%	%	

4-20. Лабораторная работа. Генератор с параллельным возбуждением

Перед выполнением работы ознакомиться с содержанием § 4-10 — 4-12.

П л а н р а б о т ы

1. Записать основные технические данные генератора и электродвигателя, вращающего генератор. Подобрать по этим данным измерительную и вспомогательную аппаратуру и записать ее технические данные.

2. Собрать схемы двигателя (рис. 4-25) и генератора (рис. 4-23) и показать их руководителю.

3. При номинальной частоте вращения генератора n_n записать в табл. 4-2 величины э. д. с. при изменении тока возбуждения от $I_B = 0$ до $I_B = I_{B.n}$. По полученным данным построить характеристику холостого хода, т. е. $E = f(I_B)$ при $n = \text{const}$ и $I = 0$.

Таблица 4-2

№ наблюдений	E	I_B	n	Примечание
	В	А	об/мин	

4. Пользуясь той же схемой соединения, установить номинальную частоту вращения, номинальный ток и номинальное напряжение.

Затем, сохраняя неизменным ток возбуждения генератора и частоту его вращения, уменьшать ток генератора от I_n до $I = 0$, записывая в табл. 4-3 величины U ; I ; I_B и n .

Таблица 4-3

№ наблюдения	U	I	I_B	n	Примечание
	В	А	А	об/мин	
	%	%			

5. Повторить опыт, сохраняя неизменными сопротивление цепи возбуждения и частоту вращения генератора.

6. По полученным данным построить внешние характеристики генератора:

а) $U=f(I)$ при $n=\text{const}$ и $I_B=\text{const}$;

б) $U=f(I)$ при $n=\text{const}$ и $r_B=\text{const}$.

Определить процентное изменение напряжения:

$$\Delta U\% = \frac{U_0 - U_{\text{н}}}{U_{\text{н}}} 100\%.$$

7. Дать заключение о проделанной работе.

Глава пятая

Основные понятия, относящиеся к переменным токам

5-1. Переменный ток

Возможность получать переменный ток различного напряжения — высокого для передачи энергии на большие расстояния, низкого для передачи на близкие расстояния и для питания приемников энергии, простота устройства однофазных и трехфазных генераторов и двигателей, надежность работы и удобство эксплуатации их и высокие технико-экономические показатели обеспечили переменному току повсеместное применение. Исключением являются некоторые области техники, например электрохимия, электрическая тяга, в которых применяется преимущественно постоянный ток, получаемый путем выпрямления переменного тока.

Переменным током обычно называют периодический ток, все значения которого повторяются через одинаковые промежутки времени, называемые периодом (T). В течение одного полупериода ток имеет одно направление, а в течение следующего — обратное.

Совокупность всех изменений переменной величины, происходящих в течение периода, называется циклом. Число периодов в секунду называется частотой (f). Частота — величина, обратная периоду

$$f = \frac{1}{T}. \quad (5-1)$$

Единица частоты называется герц (Гц), $1 \text{ Гц} = 1/\text{с}$.

В СССР для промышленных электроустановок принята стандартная частота 50 Гц. В электротермии используются частотой 50 Гц—50 МГц, а в радиотехнике 10^5 — 10^{10} Гц.

На графике переменного синусоидального тока (рис. 5-1) по оси абсцисс отложено время, а по оси ординат — значения тока.

Значения переменных величин тока, напряжения, э. д. с. в произвольный момент времени t называются мгновенными значениями, которые обозначаются строчными буквами i , u , e .

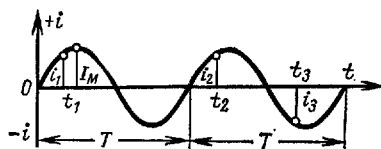


Рис. 5-1. График переменного тока.

Наибольшее из мгновенных значений периодически изменяющейся величины за время периода называется максимальным или амплитудным значением, которое обозначается прописной буквой с индексом «м», например: I_m , U_m , E_m (рис. 5-1).

Мгновенным значением тока называется отношение электрического заряда dq , проходящего через поперечное сечение проводника за бесконечно малое время dt , к продолжительности этого времени:

$$i = \frac{dq}{dt}. \quad (5-2)$$

5-2. Получение синусоидальной э. д. с.

В технике пользуются токами, напряжениями и э. д. с., изменяющимися по простейшему гармоническому закону, закону синуса, что упрощает все расчеты и устраняет нежелательные явления, наблюдаемые при изменении электрических величин по другими периодическим законам.

Между полюсами электромагнита NS простейшего генератора (рис. 5-2) расположен набранный из листов стали цилиндрический якорь. На поверхности его укреплен катушка, имеющая w витков проволоки, концы которой через контактные кольца и щетки соединены с внешней цепью.

Полюсам придана такая форма, при которой магнитная индукция B в воздушном зазоре вдоль окружности якоря

изменяется по закону синуса:

$$B = B_m \sin \alpha,$$

где α — угол, образованный нейтральной плоскостью OO' и плоскостью витков катушки.

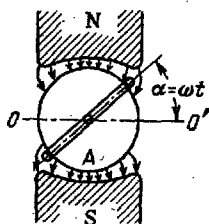


Рис. 5-2. Схематическое устройство генератора переменного тока.

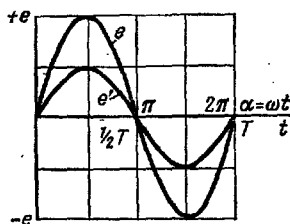


Рис. 5-3. Графики переменных э. д. с.

При вращении якоря с угловой скоростью $\omega = \alpha/t$ в каждой активной стороне витка катушки будет наводиться э. д. с. (рис. 5-3)

$$e' = Blv = B_m lv \sin \alpha = B_m lv \sin \omega t.$$

Так как число витков катушки w , а число сторон равно $2w$, то э. д. с., наводимая в катушке якоря,

$$e = e' 2w = 2B_m wlv \sin \omega t = E_m \sin \omega t, \quad (5-3)$$

где $E_m = 2B_m wlv$ — амплитуда э. д. с.

В начальный момент времени $t = 0$ плоскость витков совпадает с нейтральной плоскостью, так как $\alpha = \omega t = 0$.

У генератора с одной парой полюсов ($p = 1$) одному обороту якоря $\alpha = 2\pi$ соответствует один период изменения э. д. с. При равномерном вращении угловая скорость

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f. \quad (5-4)$$

У генератора с p парами полюсов (рис. 5-4) за один оборот каждый активный проводник обмотки якоря прой-

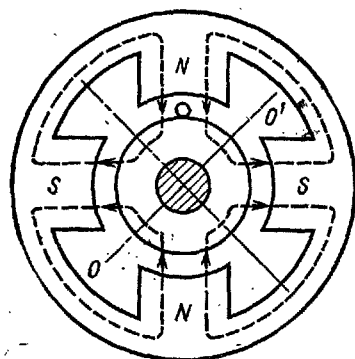


Рис. 5-4. Генератор переменного тока с двумя парами полюсов.

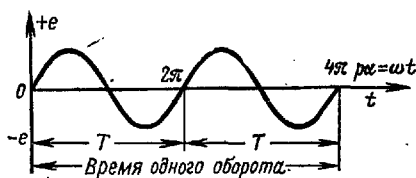
дет под p парами полюсов и, следовательно, одному обороту будет соответствовать p периодов. Таким образом,

$$e = E_m \sin(p\alpha) = E_m \sin \omega t. \quad (5-5)$$

График $e = f(t)$ за время одного оборота якоря генератора с $p = 2$ приведен на рис. 5-5.

Произведение $p\alpha$ носит название электрического угла. Отношение электрического угла ко вре-

Рис. 5-5. График переменной э. д. с. генератора с двумя парами полюсов.



мени его изменения называется электрической угловой скоростью или угловой частотой. Очевидно,

$$\omega = \frac{p\alpha}{t} = \frac{p2\pi}{pT} = 2\pi f, \quad (5-6)$$

т. е. угловая частота не зависит от числа пар полюсов генератора.

Если якорь, вращаясь, совершает n оборотов в минуту, то число оборотов в секунду будет $n/60$, а частота

$$f = \frac{n}{60} p. \quad (5-7)$$

Пример 5-1. Генератор, имеющий две пары полюсов ($p = 2$), вращается с частотой 1 500 об/мин. Определить частоту переменного тока генератора.

Решение.

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{2 \cdot 1500}{60} = 50 \text{ Гц.}$$

Пример 5-2. Гидрогенератор имеет номинальную частоту вращения 250 об/мин и частоту 50 Гц. Сколько пар полюсов имеет генератор.

Решение.

$$p = \frac{f \cdot 60}{n} = \frac{50 \cdot 60}{250} = 12 \text{ пар.}$$

5-3. Сдвиг фаз

На якоре генератора укреплены два одинаковых витка 1 и 2, сдвинутых в пространстве (рис. 5-6). При вращении якоря в витках будут наводиться э. д. с. одной частоты и с одинаковыми амплитудами, так как витки вращаются с одинаковой угловой скоростью в одном и том же маг-

нитном поле. Вследствие сдвига витков в пространстве, витки неодновременно проходят под серединами полюсов и э. д. с. неодновременно достигают амплитудных значений.

При вращении якоря с угловой скоростью ω в направлении, обратном ходу часовой стрелки, в момент начала отсчета времени ($t = 0$) витки расположены под углами

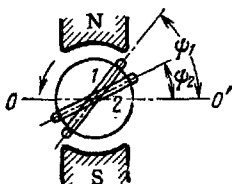


Рис. 5-6. Два витка обмотки якоря генератора.

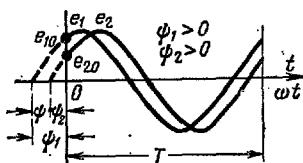


Рис. 5-7. Графики двух переменных э. д. с.

ψ_1 и ψ_2 к нейтральной плоскости OO' (рис. 5-6). Наведенные в витках э. д. с.

$$e_1 = E_m \sin(\omega t + \psi_1) \quad \text{и} \quad e_2 = E_m \sin(\omega t + \psi_2), \quad (5-8)$$

где угол $(\omega t + \psi)$ называется фазным углом или просто фазой, так что мгновенное значение синусоидальной величины определяется амплитудой и фазой.

Графики этих э. д. с. построены на рис. 5-7.

В начальный момент времени $t = 0$ наводимые в витках э. д. с.

$$e_{10} = E_m \sin \psi_1 \quad \text{и} \quad e_{20} = E_m \sin \psi_2.$$

На рис. 5-7 они изображены начальными ординатами. Электрические углы ψ_1 и ψ_2 , определяющие значения э. д. с. в начальный момент времени, называются начальными фазными углами или просто **начальными фазами**.

Таким образом, *синусоидальная величина характеризуется*: 1) *амплитудой*, 2) *частотой или периодом* и 3) *начальной фазой*.

Разность начальных фаз двух синусоидальных величин одной частоты называется **углом сдвига фаз** (сдвигом фаз):

$$\psi = \psi_1 - \psi_2. \quad (5-9)$$

Сдвиг фаз показывает, на какую часть периода или на какой промежуток времени $t = \psi/\omega = \psi T/2\pi$ одна синусоидальная

соидальная величина достигает начала периода раньше другой величины.

За начало периода считают момент времени, в который синусоидальная величина проходит через нулевое значение, после которого она положительна. Та величина, у которой начало периода достигается раньше, чем у другой, считается опережающей по фазе, а та, у которой то же значение достигается позже — отстающей по фазе.

Две синусоидальные величины, имеющие одинаковые начальные фазы, совпадают по фазе. Две синусоидальные величины, угол сдвига фаз которых равен 180° , изменяются в противофазе.

Пример 5-3. Две э. д. с. заданы уравнениями

$$e_1 = E_m \sin(\omega t + 60^\circ) \quad \text{и} \quad e_2 = E_m \sin(\omega t + 30^\circ).$$

Определить угол сдвига фаз э. д. с. e_1 и e_2 и время сдвига, если частота 50 Гц.

Решение.

Выразим начальные фазы ψ_1 и ψ_2 в радианах:

$$\psi_1 = \frac{60 \cdot 2\pi}{360} = \frac{\pi}{3}; \quad \psi_2 = \frac{30 \cdot 2\pi}{360} = \frac{\pi}{6}.$$

Угол сдвига фаз

$$\psi = \psi_1 - \psi_2 = \frac{\pi}{3} - \frac{\pi}{6} = \frac{\pi}{6}.$$

Период

$$T = 1/f = 1/50 = 0,02 \text{ с.}$$

Время сдвига фаз э. д. с. e_1 и e_2

$$t = \frac{\psi}{\omega} = \frac{\pi T}{6 \cdot 2\pi} = \frac{T}{12} = 0,00166 \text{ с.}$$

5-4. Действующие значения тока и напряжения

При расчете цепей переменного тока обычно пользуются понятием действующих (эффективных) значений переменного тока, напряжения и э. д. с.

Действующие значения тока, напряжения и э. д. с. обозначаются прописными буквами I , U , E .

На шкалах измерительных приборов и технической документации также указываются действующие значения величин.

Действующее значение переменного тока равно значению такого эквивалентного постоянного тока, который, проходя через то же сопротивление, что и переменный ток, выделяет в нем за период то же количество тепла.

Количество тепла, выделенное переменным током в сопротивлении r за бесконечно малый промежуток времени dt ,

$$dw_{\tau} = i^2 r dt,$$

а за период переменного тока T

$$W_{\tau} = \int_0^T dw_{\tau} = \int_0^T i^2 r dt.$$

Приравняв полученное выражение W_{τ} количеству тепла $I^2 r T$, выделенному в том же сопротивлении r постоянным током I за то же время T , получим:

$$I^2 r T = \int_0^T i^2 r dt.$$

Сократив общий множитель r , получим действующее значение тока

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}. \quad (5-10)$$

Рис. 5-8. График переменного тока и квадрата тока.

На рис. 5-8 построена кривая мгновенных значений тока i и кривая квадратов мгновенных значений i^2 . Площадь, ограниченная последней кривой (i^2) и осью абсцисс, представляет собой в некотором масштабе величину, определяемую выражением $\int_0^T i^2 dt$. Высота Ab прямоугольника $AbcDA$, равновеликого площади, ограниченной кривой i^2 и осью абсцисс, равная среднему значению ординат кривой i^2 , представляет собой квадрат действующего значения тока I^2 .

Если ток изменяется по закону синуса, т. е.

$$i = I_m \sin \omega t,$$

то

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt}.$$

Так как

$$\int_0^T \sin^2 \omega t \, dt = \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \, dt = \frac{1}{2} \int_0^T dt - \\ - \frac{1}{2} \int_0^T \cos 2\omega t \, dt = \frac{T}{2} - 0 = \frac{T}{2},$$

то

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} I_M^2 \frac{T}{2}} = \sqrt{\frac{I_M^2}{2}} = \frac{I_M}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_M. \quad (5-11)$$

Аналогично для действующих значений синусоидальных напряжений и э. д. с. можно написать:

$$U = \frac{U_M}{\sqrt{2}} \approx 0,707 U_M \quad \text{и} \quad E = \frac{E_M}{\sqrt{2}} \approx 0,707 E_M. \quad (5-12)$$

Пример 5-4. Напряжение, измеренное вольтметром, $U = 220$ В. Определить амплитуду напряжения.

Решение.

$$U_M = \sqrt{2} U = 1,41 \cdot 220 = 310 \text{ В.}$$

Кроме действующего значения тока и напряжения, иногда пользуются еще понятием среднего значения тока и напряжения.

Среднее значение синусоидального тока за период равно нулю, так как в течение первой половины периода определенное количество электричества Q проходит через поперечное сечение проводника в прямом направлении. В течение второй половины периода то же количество электричества проходит через сечение проводника в обратном направлении. Следовательно, количество электричества, прошедшее через сечение проводника за период, равно нулю, равно нулю и среднее за период значение синусоидального тока.

Поэтому среднее значение синусоидального тока $I_{\text{ср}}$ вычисляют за полупериод, в течение которого ток остается положительным. Среднее значение тока равно отношению количества электричества, прошедшего через сечение проводника за половину периода, к продолжительности этого полупериода. Таким образом,

$$I_{\text{ср}} = \frac{Q}{T/2} = \frac{2}{T} Q = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i \, dt, \quad (5-13)$$

причем начало отсчета времени $t = 0$ должно совпадать с началом периода. Аналогично определяются средние значения напряжения и э. д. с.

$$U_{\text{ср}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} u \, dt \quad \text{и} \quad E_{\text{ср}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} e \, dt. \quad (5-14)$$

Среднее за полупериод значение тока можно представить графически высотой прямоугольника с основанием,

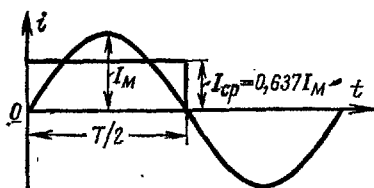


Рис. 5-9. Среднее значение тока за полупериод.

равным $T/2$, и площадью, равной площади, которая ограничена осью абсцисс и кривой тока от начала периода до половины периода (рис. 5-9).

Среднее значение синусоидального тока можно выразить через его амплитудное значение следующим образом:

$$\begin{aligned} I_{\text{ср}} &= \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i \, dt = \frac{2I_M}{T} \int_0^{T/2} \sin \omega t \, dt = \\ &= -\frac{2I_M}{T\omega} \cos \omega t \Big|_0^{T/2} = \frac{2}{\pi} I_M = 0,637 I_M. \end{aligned} \quad (5-15)$$

Такое же соотношение имеет место для напряжения и для э. д. с.

$$U_{\text{ср}} = \frac{2}{\pi} U_M \quad \text{и} \quad E_{\text{ср}} = \frac{2}{\pi} E_M. \quad (5-16)$$

5-5. Векторная диаграмма

Синусоидальные величины изображают кривыми — синусоидами (см. § 5-1—5-3) или вращающимися векторами. Последний способ позволяет значительно упростить графическое изображение синусоидальных величин и графическое определение суммы и разности нескольких величин.

При изображении синусоидальной величины, например э. д. с. $e = E_M \sin(\omega t + \psi)$, вращающимся вектором

(рис. 5-10) длина его OA в определенном масштабе представляет амплитуду E_m ; угол, образованный вектором с положительной полуосью абсцисс X , в начальный момент времени $t = 0$ равен начальной фазе ψ , а угловая скорость вращения вектора равна угловой частоте ω . Проекция

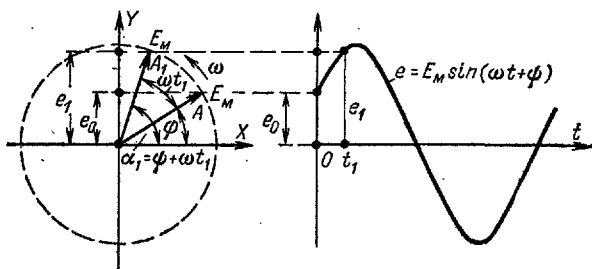


Рис. 5-10. Изображение синусоидальной величины вращающимся вектором.

вектора на ось ординат Y в том же масштабе дает мгновенное значение э. д. с. e .

Действительно, в момент времени $t = 0$ э. д. с. $e_0 = E_m \sin \psi$ выражается проекцией вектора OA на ось Y . В момент времени t_1 , э. д. с. $e_1 = E_m \sin (\omega t_1 + \psi)$ выражается проекцией вектора, занявшего новое положение OA_1 на ось Y .

Совокупность нескольких векторов, изображающих синусоидальные величины одной частоты, называется векторной диаграммой.

Так как угловая скорость всех векторов на векторной диаграмме одинакова, то взаимное расположение их на диаграмме не меняется. Нача-

ло отсчета времени для периодической кривой можно выбрать произвольно, поэтому при построении один из векторов на векторной диаграмме можно расположить произвольно, а остальные векторы располагать по отношению к нему под углами, равными углам сдвига фаз.

Сложение двух синусоидальных величин можно заменить сложением векторов, каждый из которых изображает соответствующую синусоидальную величину. Например,

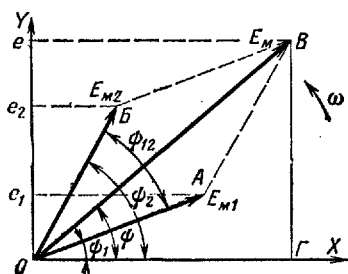


Рис. 5-11. Сложение двух векторов э. д. с.

если даны две э. д. с. $e_1 = E_{m1} \sin(\omega t + \psi_1)$ и $e_2 = E_{m2} \sin \times (\omega t + \psi_2)$, представленные векторами OA и OB (рис. 5-11), то для сложения вектор OA переносят параллельно самому себе так, чтобы начало его совпало с концом вектора OB , тогда замыкающий вектор OB будет представлять вектор суммарной э. д. с. e . Правильность сказанного следует из того, что проекции вектора OA и OB на ось ординат представляют собой мгновенные значения e_1 и e_2 , а сумма этих проекций равна проекции вектора OB , представляющего собой вектор суммарной э. д. с. e .

Из треугольника векторов можно найти амплитуду суммарной э. д. с. и тангенс ее начального фазного угла (рис. 5-11).

Вычитание синусоидальных величин производится как сложение уменьшаемой величины с обратной по знаку вычитаемой величиной, т. е.

$$e_1 - e_2 = e_1 + (-e_2).$$

Глава шестая

Цепи переменного тока

6-1. Особенности цепей переменного тока

В электрической цепи при постоянном напряжении на ее зажимах ток, мощность и энергия, запасенная в электрическом и магнитном полях, остаются неизменными.

При переменном напряжении на зажимах цепи все перечисленные величины изменяются.

Электрическую цепь, в которой происходит преобразование электрической энергии в тепловую и в которой происходит изменение энергии, сосредоточенной в упомянутых выше полях, характеризуют тремя параметрами: сопротивлением r , индуктивностью L и емкостью C .

В технике встречаются цепи, физические явления в которых определяются одним из параметров r , L или C , так как влиянием других можно пренебречь. Например лампы накаливания, резисторы или нагревательные приборы характеризуются только сопротивлением r ; трансформаторы, работающие без нагрузки — индуктивностью L ; кабель, работающий вхолостую, характеризуется только его емкостью.

6-2. Цепь с сопротивлением

а) Напряжение и ток

При синусоидальном напряжении

$$u = U_m \sin \omega t$$

на зажимах цепи с сопротивлением r (рис. 6-1) ток в ней по закону Ома

$$i = \frac{u}{r} = \frac{U_m}{r} \sin \omega t = I_m \sin \omega t.$$

Следовательно, ток изменяется синусоидально, совпадая по фазе с напряжением (рис. 6-2, а и 6-3).

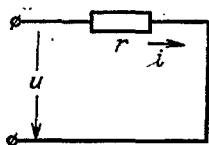
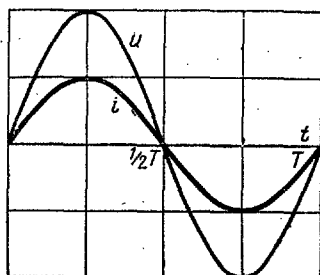


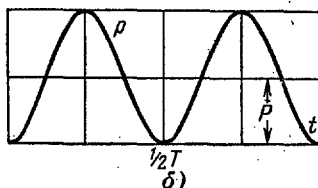
Рис. 6-1. Цепь с активным сопротивлением.



а)



Рис. 6-3. Векторная диаграмма цепи с сопротивлением.



б)

Рис. 6-2. Графики тока, напряжения и мощности цепи с сопротивлением.

Для данной цепи закон Ома применим как для мгновенных и амплитудных значений $i = u/r$ и $I_m = U_m/r$, так и для действующих значений:

$$I = 0,707 I_m = 0,707 U_m / r = U / r. \quad (6-1)$$

б) Мощность

Мгновенное значение мощности или просто мгновенная мощность — это произведение мгновенных значений напряжения и тока для одного и того же момента времени, т. е.

$$p = ui = i^2 r = I_m^2 r \sin^2 \omega t.$$

Электрическая энергия преобразуется в тепло независимо от направления тока, поэтому мгновенная мощность положительна при прямом и обратном направлениях тока (рис. 6-2, б).

Так как $\sin^2 \omega t = 1/2 - 1/2 \cos 2\omega t$ и $1/2 I_M^2 = (I_M/\sqrt{2})^2 = I^2$, то можно написать:

$$p = I_M^2 r \sin^2 \omega t = 1/2 I_M^2 r - 1/2 I_M^2 r \cos 2\omega t = I^2 r - I^2 r \cos 2\omega t.$$

Постоянная составляющая $I^2 r$ представляет собой среднюю скорость преобразования электрической энергии в тепло, или что то же, среднюю за период мощность

$$P = I^2 r = I I r = I U. \quad (6-2)$$

Она называется активной мощностью, а сопротивление r — активным сопротивлением.

Единицей измерения активной мощности, так же как и мощности в цепи постоянного тока, служит ватт (Вт).

6-3. Цепь с индуктивностью

а) Напряжение и ток

При токе $i = I_M \sin \omega t$ в цепи с индуктивностью (рис. 6-4) в ней индуцируется э. д. с. самоиндукции (3-37)

$$\begin{aligned} e_L &= -L \frac{di}{dt} = -L \frac{d(I_M \sin \omega t)}{dt} = \\ &= -L I_M \omega \cos \omega t = E_{L_M} \sin(\omega t - \pi/2). \end{aligned} \quad (6-3)$$

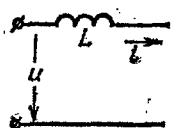
Если цепь с индуктивностью обладает ничтожно малым сопротивлением ($r = 0$), то по второму закону Кирхгофа

$$u + e_L = i r = 0,$$

откуда напряжение на зажимах цепи

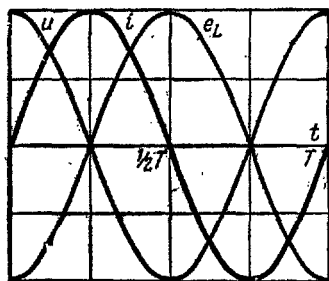
$$u = -e_L = L I_M \omega \cos \omega t = U_M \sin(\omega t + \pi/2). \quad (6-4)$$

Рис. 6-4. Цепь с индуктивностью.

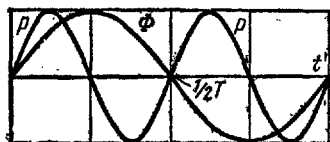


Следовательно, приложенное к цепи напряжение вызывает в ней такой ток, магнитное поле которого при своем изменении в каждый момент времени индуцирует э. д. с. самоиндукции, равную по величине и противоположную по направлению приложенному напряжению, т. е. уравнивающую это напряжение (рис. 6-5 и 6-6).

Из уравнения (6-4) и рис. 6-5 и 6-6 следует, что ток отстаёт по фазе от напряжения на $1/4$ периода (на $\pi/2$) или опережает по фазе э. д. с. e_L на $1/4$ периода. Это вызывается тем, что индуктированная э. д. с. e_L пропорциональна скорости изменения тока по времени. При прохождении тока через макси-



а)



б)

Рис. 6-5. Графики тока, магнитного потока, напряжения и мощности цепи с индуктивностью.

мального значения, когда скорость изменения его равна нулю, э. д. с. e_L также равна нулю; при прохождении тока через нулевое значение, когда

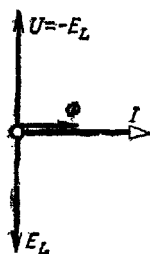


Рис. 6-6. Векторная диаграмма цепи с индуктивностью.

скорость изменения его наибольшая, э. д. с. $e_L = E_{Lm}$. По закону Ленца при положительном приращении тока ($di/dt > 0$) э. д. с. e_L направлена встречно току, и наоборот, при отрицательном приращении тока ($di/dt < 0$) э. д. с. e_L направлена одинаково с током. Поэтому, например, в течение первой четверти периода (рис. 6-5) при нарастании тока э. д. с. e_L отрицательна, а в течение второй четверти периода, при убывании тока э. д. с. e_L положительна.

б) Индуктивное сопротивление

Из (6-3) и (6-4) следует, что

$$U_m = E_{Lm} = I_m \omega L, \quad (6-5)$$

откуда напишем закон Ома для амплитудных значений:

$$I_m = \frac{U_m}{\omega L} = \frac{U_m}{x_L}. \quad (6-6)$$

Разделив на $\sqrt{2}$ написанное выражение, получим закон Ома для действующих значений:

$$I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{x_L}. \quad (6-7)$$

Величина отношения напряжения к току цепи

$$U/I = x_L = \omega L = 2\pi fL \quad (6-8)$$

называется реактивным сопротивлением индуктивности, или, короче, индуктивным сопротивлением. Индуктивное сопротивление пропорционально величине индуктивности и частоте тока. При постоянном токе оно равно нулю.

в) Мощность

Мгновенная мощность цепи с индуктивностью

$$\begin{aligned} p = ui &= U_m \sin(\omega t + \pi/2) I_m \sin \omega t = U_m I_m \cos \omega t \sin \omega t = \\ &= U_m I_m \frac{1}{2} \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t. \end{aligned} \quad (6-9)$$

Мощность изменяется с двойной частотой (рис. 6-5), 2 раза в течение периода достигая положительного максимума $UI = I^2 \omega L$ и 2 раза достигая такого же по величине отрицательного максимума.

При нарастании тока, а следовательно и магнитного потока (первая и третья четверти периода, рис. 6-5) независимо от его направления, происходит накопление энергии магнитного поля от нуля до максимального значения (§ 3-39):

$$W_m = \frac{1}{2} LI_m^2 = LI^2,$$

которая получается от генератора; таким образом, цепь работает в режиме потребителя, что соответствует положительному значению мощности цепи.

При уменьшении тока, а следовательно и магнитного потока (вторая и четвертая четверти периода, рис. 6-5), происходит уменьшение энергии магнитного поля от максимального значения до нуля, которая возвращается цепью генератору. Таким образом, в эти части периода цепь работает в режиме генератора, что соответствует отрицательному значению мощности цепи с индуктивностью.

Активная мощность P в цепи с индуктивностью равна нулю.

Максимальное значение мощности Q в цепи с индуктивностью принято называть реактивной мощностью.

Из (6-9) следует, что

$$Q = \frac{1}{2} U_m I_m = UI = I^2 \omega L = \omega W_m. \quad (6-10)$$

Единица измерения реактивной мощности носит название вольт-ампер реактивный (вар).

Пример 6-1. Цепь с индуктивностью 0,02 Г включена под напряжение 127 В и частотой 50 Гц.

1. Определить индуктивное сопротивление цепи, ток и реактивную мощность.

Решение.

$$x_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,02 = 6,28 \text{ Ом};$$

$$I = U/x_L = 127/6,28 = 20,25 \text{ А};$$

$$Q = UI = 127 \cdot 20,25 = 2571,75 \text{ вар}.$$

2. Определить реактивное сопротивление индуктивности и ток в цепи при частоте 1 000 Гц.

Решение.

$$x_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 1\,000 \cdot 0,02 = 125,6 \text{ Ом};$$

$$I = U/x_L = 127/125,6 \approx 1,01 \text{ А}.$$

г) Зависимость напряжения на индуктивности от магнитного потока

В некоторых случаях расчета цепей переменного тока напряжение на индуктивности удобно выразить через магнитный поток.

Если все витки катушки (контура) пронизываются одним магнитным потоком, то амплитуда потокосцепления самоиндукции

$$\Psi_m = \omega \Phi_m = LI_m.$$

В этом случае э. д. с. самоиндукции и равное ей по величине напряжение на зажимах

$$U = E_L = \omega LI_m / \sqrt{2} = 2\pi f \omega \Phi_m / \sqrt{2} = 4,44 f \omega \Phi_m. \quad (6-11)$$

6-4. Цепь с активным сопротивлением и индуктивностью

а) Напряжение и ток

Если по катушке с активным сопротивлением r и индуктивностью L (рис. 6-7) проходит переменный ток (рис. 6-8 и 6-9)

$$i = I_m \sin \omega t,$$

то по второму закону Кирхгофа

$$u + e_L = ir,$$

откуда напряжение на зажимах катушки (цепи)

$$u = ir - e_L = ir + L \frac{di}{dt} = u_a + u_L.$$

Первая слагающая напряжения $u_a = ir$ называется активным напряжением, а вторая $u_L = -e_L = -L \frac{di}{dt}$ — реактивным напряжением.

Активное напряжение (рис. 6-8 и 6-9)

$$u_a = ir = I_m r \sin \omega t = U_{a.m} \sin \omega t$$

изменяется синусоидально, совпадая по фазе с током.

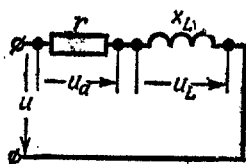


Рис. 6-7. Цепь с активным сопротивлением и индуктивностью.

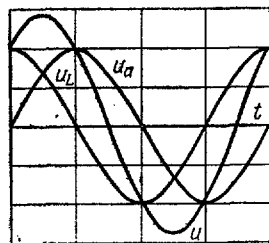
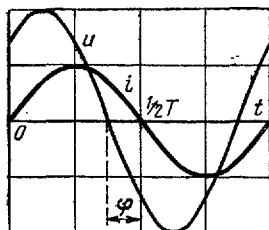


Рис. 6-8. Графики тока и напряжения в цепи с активным сопротивлением и индуктивностью.

Амплитуда активного напряжения

$$U_{a.m} = I_m r,$$

а действующее значение его

$$U_a = Ir.$$

Реактивное напряжение (рис. 6-8 и 6-9),

$$u_L = L \frac{di}{dt} = \omega L I_m \cos \omega t = U_{L.m} \sin (\omega t + \pi/2)$$

изменяется синусоидально, опережая по фазе ток на 90° .

Амплитуда реактивного напряжения

$$U_{L.m} = \omega L I_m,$$

а действующее значение его

$$U_L = \omega L I = x_L I.$$

Напряжение на зажимах цепи. (рис. 6-8 и 6-9)

$$u = u_a + u_L = U_{a.m} \sin \omega t + U_{L.m} \sin (\omega t + \pi/2) = U_m \sin (\omega t + \varphi). \quad (6-12)$$

изменяется синусоидально, опережая по фазе ток на угол φ .

Векторы напряжений U_a , U_L и U (рис. 6-9) образуют прямоугольный *треугольник напряжений*, из которого следует, что

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}. \quad (6-13)$$

Такой же зависимостью связаны и амплитуды соответствующих напряжений:

$$U_m = \sqrt{U_{a.m}^2 + U_{L.m}^2}.$$

Угол сдвига фаз между напряжением и током в цепи определяется из треугольника напряжений (рис. 6-9) через

$$\cos \varphi = U_a/U \quad \text{или} \quad \operatorname{tg} \varphi = U_L/U_a.$$

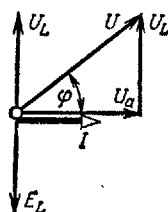


Рис. 6-9. Векторная диаграмма цепи с активным сопротивлением и индуктивностью.

6) Полное сопротивление цепи

Выразив в уравнении (6-13) составляющие напряжения через произведения тока и сопротивлений, получим:

$$U = \sqrt{(Ir)^2 + (Ix_L)^2} = I \sqrt{r^2 + x_L^2} = Iz,$$

откуда ток в цепи

$$I = U/z = U/\sqrt{r^2 + x_L^2}. \quad (6-14)$$

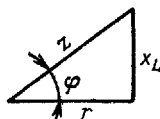
Полученные формулы выражают закон Ома для действующих значений цепи с сопротивлением r и индуктивностью L .

Величина

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2} \quad (6-15)$$

называется **полным сопротивлением** цепи.

Рис. 6-10. Треугольник сопротивлений цепи с активным сопротивлением и индуктивностью.



Графически сопротивления r , x_L и z изображают сторонами прямоугольного *треугольника сопротивлений* (рис.6-10). Этот треугольник можно получить, уменьшив в I раз стороны треугольника напряжений.

Угол между сторонами треугольника z и r равен углу сдвига фаз φ между напряжением и током, так как

$$\cos \varphi = \frac{U_a}{U} = \frac{Ir}{Iz} = \frac{r}{z}, \quad \text{а} \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L}{U_a} = \frac{x_L}{r}. \quad (6-16)$$

Чем больше реактивное напряжение по сравнению с активным или чем больше реактивное сопротивление по сравнению с активным, тем на больший угол ток отстает по фазе от напряжения цепи.

в) Мощность

В цепи с r и L мгновенная мощность

$$p = ui = U_m \sin(\omega t + \varphi) I_m \sin \omega t = \frac{U_m I_m}{2} \cos \varphi - \\ - \frac{U_m I_m}{2} \cos(2\omega t + \varphi) = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi). \quad (6-17)$$

Из уравнения (6-17) следует, что мгновенная мощность состоит из постоянной слагающей мощности $UI \cos \varphi$ и переменной слагающей $-UI \cos(2\omega t + \varphi)$, изменяющейся синусоидально с двойной частотой. Средняя за период мощность, принимаемая обычно при расчетах, равна постоянной мощности $UI \cos \varphi$, так как среднее за период значение гармонической функции равно нулю.

Следовательно, средняя мощность цепи равна произведению действующих значений напряжения и тока, умноженному на $\cos \varphi$, т. е.

$$P = UI \cos \varphi. \quad (6-18)$$

Приняв во внимание, что $U \cos \varphi = U_a = Ir$, получим:

$$P = UI \cos \varphi = U_a I = I^2 r.$$

Таким образом, средняя мощность в активном сопротивлении (6-2) $P = U_a I$ в то же время представляет собой среднюю или активную мощность цепи с r и L , т. е. $P = UI \cos \varphi$.

Реактивная мощность цепи (6-10), характеризующая обмен энергией между генератором и цепью,

$$Q = U_L I = I^2 x_L = I^2 z \sin \varphi = UI \sin \varphi \quad (6-19)$$

равна произведению действующих значений напряжения и тока, умноженному на $\sin \varphi$.

Произведение действующих значений напряжений и тока, т. е.

$$S = UI, \quad (6-20)$$

называется **полной мощностью цепи**.

Единица полной мощности называется **вольт-ампер (В·А)**.

Активная, реактивная и полная мощности графически изображаются сторонами прямоугольного *треугольника мощностей* (рис. 6-11), так как они связаны соотношением

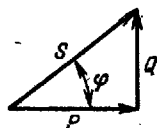


Рис. 6-11. Треугольник мощностей.

$$P^2 + Q^2 = S^2 \quad \text{или} \\ (UI \cos \varphi)^2 + (UI \sin \varphi)^2 = (UI)^2. \quad (6-21)$$

Треугольник мощностей можно получить, умножив на ток стороны треугольника напряжений.

Отношение активной мощности к полной

$$P/S = \cos \varphi \quad (6-22)$$

называется **коэффициентом мощности**.

Габариты, масса, стоимость и конструкция электрической машины или аппарата определяются их номинальной полной мощностью $S_n = U_n I_n$, а полная мощность S при том или ином режиме работы определяет степень их использования.

Пример 6-2. Катушка с индуктивностью $L = 102 \text{ мГ} = 0,102 \text{ Г}$ и активным сопротивлением 24 Ом находится под напряжением 240 В частотой 50 Гц . Определить величины: x_L , z , I , U_a , U_L , $\cos \varphi$ и P .

Решение.

$$x_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,102 = 32 \text{ Ом};$$

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{24^2 + 32^2} = 40 \text{ Ом};$$

$$I = U/z = 240/40 = 6 \text{ А}; \quad U_a = Ir = 6 \cdot 24 = 144 \text{ В};$$

$$U_L = Ix_L = 6 \cdot 32 = 192 \text{ В}; \quad \cos \varphi = r/z = 24/40 = 0,6;$$

$$P = UI \cos \varphi = 240 \cdot 6 \cdot 0,6 = 864 \text{ Вт}.$$

6-5. Неразветвленная цепь с активными сопротивлениями и индуктивностями

Напряжения на активных сопротивлениях двух катушек, соединенных последовательно (рис. 6-12), $U_{a1} = Ir_1$ и $U_{a2} = Ir_2$ совпадают по фазе с током I . Напряже-

ния на реактивных сопротивлениях катушек $U_{L1} = Ix_{L1}$ и $U_{L2} = Ix_{L2}$ опережают по фазе ток на 90° (рис. 6-13).

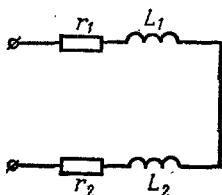


Рис. 6-12. Схема последовательного соединения двух катушек.

Напряжение на зажимах неразветвленной цепи, состоящей из двух катушек, найдем по правилу треугольника:

$$U = \sqrt{(U_{a1} + U_{a2})^2 + (U_{L1} + U_{L2})^2} = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}.$$

Выражая слагающие напряжений через ток и сопротивления, получаем:

$$U = I \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_{L1} + x_{L2})^2} = I \sqrt{r^2 + x^2} = Iz,$$

где $r = r_1 + r_2$ — активное сопротивление цепи;
 $x_L = x_{L1} + x_{L2}$ — реактивное сопротивление цепи.
 Полное сопротивление цепи

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2}.$$

На рис. 6-14 оно изображено гипотенузой прямоугольного треугольника сопротивлений, который можно полу-

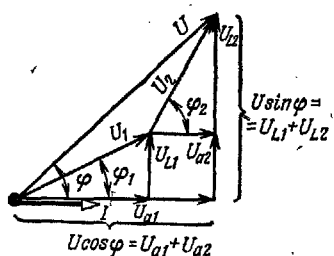


Рис. 6-13. Векторная диаграмма для неразветвленной цепи.

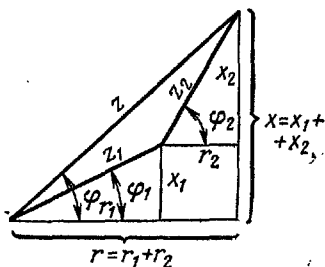


Рис. 6-14. Треугольник сопротивлений для неразветвленной цепи.

чить из треугольника напряжений, уменьшая каждую из сторон его в I раз.

Ток цепи

$$I = U/z$$

отстает по фазе от напряжения цепи на угол φ , который можно определить через его косинус или его тангенс:

$$\cos \varphi = \frac{r}{z} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{x_L}{r}.$$

Средняя, или активная мощность цепи двух катушек

$$P = P_1 + P_2 = UI \cos \varphi.$$

Реактивная и полная мощности этой цепи

$$Q = UI \sin \varphi \quad \text{и} \quad S = UI.$$

6-6. Разветвленная цепь с активными сопротивлениями и индуктивностями

Ток в первой параллельной ветви (рис. 6-15)

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{U}{\sqrt{r_1^2 + x_{L1}^2}}$$

отстает по фазе от напряжения на угол, который можно определить через его $\operatorname{tg} \varphi = x_{L1}/r_1$.

Ток во второй параллельной ветви (рис. 6-15)

$$I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{U}{\sqrt{r_2^2 + x_{L2}^2}}$$

отстает по фазе от напряжения на угол, тангенс которого $\operatorname{tg} \varphi_2 = x_{L2}/r_2$. Для упрощения расчетов разветвленных це-

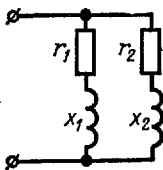


Рис. 6-15. Схема параллельного соединения двух катушек.

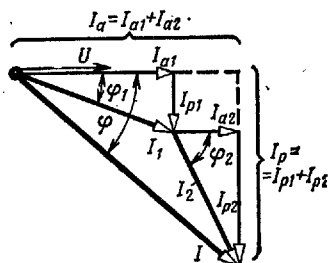


Рис. 6-16. Векторная диаграмма разветвленной цепи переменного тока.

пей ток каждой ветви раскладывается на слагающие. Одна слагающая — активная (I_a) совпадает по фазе с напряжением. Другая слагающая — реактивная (I_p) сдвинута по фазе от напряжения на 90° .

Слагающие тока первой параллельной ветви (рис. 6-16)

$$\left. \begin{aligned} I_{a1} &= I_1 \cos \varphi_1 = \frac{U}{z_1} \frac{r_1}{z_1} = U \frac{r_1}{z_1^2} = U g_1 \\ I_{p1} &= I_1 \sin \varphi_1 = \frac{U}{z_1} \frac{x_{L1}}{z_1} = U \frac{x_{L1}}{z_1^2} = U b_1, \end{aligned} \right\} \quad (6-23)$$

где g_1 и b_1 — активная и реактивная проводимости.

При построении векторной диаграммы вектор активной слагающей тока откладывается по направлению вектора напряжения. Вектор реактивной индуктивной слагающей откладывается под углом 90° в направлении вращения часовой стрелки. Замыкающий вектор треугольника токов представляет собой вектор тока первой ветви

$$\begin{aligned} I_1 &= \sqrt{I_{a1}^2 + I_{p1}^2} = \sqrt{(U g_1)^2 + (U b_1)^2} = \\ &= U \sqrt{g_1^2 + b_1^2} = U y_1, \end{aligned} \quad (6-23a)$$

где $y_1 = \frac{1}{z_1} = \sqrt{g_1^2 + b_1^2}$ — полная проводимость ветви.

Для второй параллельной ветви

$$I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2; \quad I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2; \quad I = \sqrt{I_{a2}^2 + I_{p2}^2}.$$

Сумма активных слагающих токов ветвей, совпадающих по фазе, равна активной слагающей общего тока:

$$I_a = I_{a2} + I_{a1}.$$

Сумма реактивных слагающих токов ветвей, имеющих одну и ту же фазу, равна реактивной слагающей общего тока

$$I_p = I_{p1} + I_{p2}.$$

Общий ток, проходящий в неразветвленной части цепи,

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}.$$

Этот ток сдвинут по фазе от напряжения на угол φ , который можно определить через

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_p}{I_a}.$$

Активная мощность цепи равна сумме активных мощностей отдельных ветвей:

$$P = P_1 + P_2 = U I_1 \cos \varphi_1 + U I_2 \cos \varphi_2 = U I \cos \varphi.$$

Аналогично реактивная мощность цепи

$$Q = Q_1 + Q_2 = UI_1 \sin \varphi_1 + UI_2 \sin \varphi_2 = UI \sin \varphi.$$

Полная мощность цепи

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

Пример 6-3. Цепь с двумя параллельными ветвями (рис. 6-15), в одной из которых включена катушка с активным сопротивлением $r = 1$ Ом и реактивным сопротивлением $x_{L1} = 3$ Ом, а в другой катушка с сопротивлениями $r = 3$ Ом и $x_{L2} = 2$ Ом, присоединена к сети с напряжением 230 В. Определить токи в ветвях и общий ток цепи.

Решение.

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{230}{\sqrt{1^2 + 3^2}} = 72,8 \text{ А}; \quad I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{230}{\sqrt{3^2 + 2^2}} = 64 \text{ А};$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{r_1}{z_1} = \frac{1}{3,16} = 0,317; \quad \sin \varphi_1 = \frac{x_{L1}}{z_1} = \frac{3}{3,16} = 0,95;$$

$$\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{z_2} = \frac{3}{3,6} = 0,833; \quad \sin \varphi_2 = \frac{x_{L2}}{z_2} = \frac{2}{3,6} = 0,556.$$

Слагающие тока первой параллельной ветви

$$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1 = 72,8 \cdot 0,317 = 23 \text{ А};$$

$$I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1 = 72,8 \cdot 0,95 = 69 \text{ А}.$$

Слагающие тока второй параллельной ветви

$$I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2 = 64 \cdot 0,833 = 53,2 \text{ А};$$

$$I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2 = 64 \cdot 0,556 = 35,4 \text{ А}.$$

Слагающие общего тока

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = 23 + 53,2 = 76,2 \text{ А};$$

$$I_p = I_{p1} + I_{p2} = 69 + 35,4 = 104,4 \text{ А}.$$

Общий ток цепи

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{76,2^2 + 104,4^2} = 129,4 \text{ А}.$$

6-7. Цепь с емкостью

а) Напряжение и ток

Если на зажимах конденсатора (рис. 6-17) напряжение

$$u = U_m \sin \omega t,$$

то на обкладках его заряд

$$q = Cu = CU_m \sin \omega t$$

изменяется пропорционально напряжению (рис. 6-18).

Ток в цепи конденсатора, равный скорости изменения заряда по времени,

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt}$$

пропорционален скорости изменения напряжения на его зажимах.

Синусоидальное напряжение в моменты прохождения через нулевые значения (рис. 6-18) имеет наибольшую скорость изменения, следовательно, в эти моменты времени сила

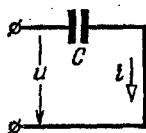


Рис. 6-17.
Цепь с емкостью.

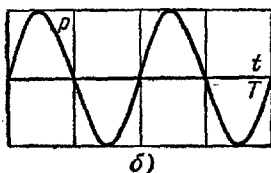
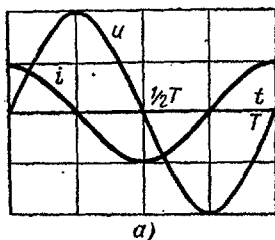


Рис. 6-18. Графики тока, напряжения и мощности цепи с емкостью.

тока в цепи конденсатора будет иметь наибольшее значение. В моменты прохождения напряжения через амплитудные значения скорость изменения его, а следовательно, и сила тока в цепи будут равны нулю.

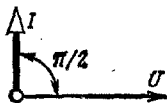


Рис. 6-19. Векторная диаграмма цепи с емкостью.

Таким образом, ток в цепи конденсатора

$$i = C \frac{du}{dt} = C U_m \frac{d \sin \omega t}{dt} = C \omega U_m \cos \omega t = I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (6-24)$$

изменяется синусоидально, опережая по фазе напряжение на угол 90° (рис. 6-19).

б) Емкостное сопротивление

Из выражения (6-24) следует, что амплитуда тока

$$I_m = C \omega U_m.$$

Разделив написанное выражение на $\sqrt{2}$, получим:

$$I = C\omega U = \frac{U}{1/\omega C} = \frac{U}{x_C}. \quad (6-25)$$

Полученная формула выражает закон Ома для действующих значений цепи с конденсатором емкостью C .

Величина

$$x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC} \quad (6-26)$$

называется реактивным сопротивлением емкости или емкостным сопротивлением.

Емкостное сопротивление обратно пропорционально емкости и частоте переменного тока. При изменении частоты от $f = 0$ (постоянный ток) до $f = \infty$ оно изменяется от $x_C = \infty$ до $x_C = 0$.

в) Мощность

Мгновенное значение мощности

$$p = ui = U_m \sin \omega t I_m \cos \omega t = UI \sin 2\omega t.$$

На рис. 6-18 показан график мгновенной мощности.

Мгновенная мощность в цепи с емкостью изменяется с двойной частотой, достигая то положительного максимума

$UI = I^2 \frac{1}{\omega C}$, то такого же по величине отрицательного максимума. При нарастании напряжения (первая и третья четверти периода рис. 6-18) происходит накопление энергии электрического поля от нуля до максимального значения

$$W_m = \frac{CU_m^2}{2} = CU^2, \quad (6-27)$$

которая получается от генератора. Таким образом, цепь работает в режиме потребителя, что соответствует положительному значению мощности.

При уменьшении напряжения (вторая и четвертая четверти периода, рис. 6-18) происходит уменьшение накопленной энергии электрического поля от максимального значения до нуля и она возвращается цепью генератору. Таким образом, в эти части периода цепь работает в режиме генератора, что соответствует отрицательному значению мощности цепи с емкостью. Энергия, получаемая цепью за полупериод, равна нулю, следовательно, равна нулю и средняя мощность цепи.

Максимальное значение мощности в цепи с емкостью называется реактивной мощностью:

$$Q = UI = U^2 \omega C = W_m \omega.$$

Она характеризует скорость обмена энергией между генератором и цепью с емкостью.

Пример 6-4. Конденсатор емкостью 80 мкФ включен в сеть с напряжением 380 В и частотой 50 Гц. Определить: x_C , I и W_m .

Решение.

$$x_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 80 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{25000} \approx 40 \text{ Ом};$$

$$I = \frac{U}{x_C} = \frac{380}{40} = 9,5 \text{ А};$$

$$W_m = CU^2 = 80 \cdot 10^{-6} \cdot 380^2 = 11,5 \text{ Дж}.$$

6-8. Колебательный контур

В начальный момент времени, когда заряженный конденсатор замыкается на реактивную катушку с ничтожно малым активным сопротивлением (рис. 6-20), напряжение на конденсаторе имеет максимальное значение U_{Cm} и в электрическом поле конденсатора запасена энергия $W_{Cm} = CU_{Cm}^2/2$.

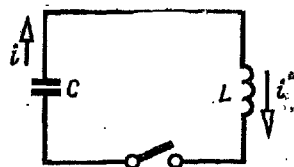


Рис. 6-20. Колебательный контур.

После замыкания рубильника конденсатор начнет разряжаться и в цепи возникнет ток. При этом напряжение на электродах конденсатора уменьшается и потенциальная энергия электрического поля конденсатора переходит в кинетическую энергию магнитного поля катушки.

По мере разряда конденсатора ток в цепи постепенно увеличивается, достигая максимального значения, когда конденсатор окончательно разрядится. В это время в магнитном поле цепи будет запасена энергия

$$W_m = \frac{LI_m^2}{2} = \frac{CU_{Cm}^2}{2}. \quad (6-28)$$

Уменьшение напряжения на конденсаторе до нуля не вызывает прекращения тока в цепи вследствие наличия магнитного поля. Ток в цепи будет поддерживаться э. д. с. самоиндукции, которая при его уменьшении имеет положительное значение. Ток прежнего направления в цепи разря-

женного конденсатора вызывает перенос электронов с пластины, бывшей ранее отрицательной, на пластину, бывшую ранее положительной, таким образом, первая начнет заряжаться положительно, а вторая отрицательно. При отсутствии активного сопротивления этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока конденсатор не зарядится до напряжения, равного начальному по величине, но обратного знака. Далее конденсатор начнет разряжаться в обратном направлении, а затем снова заряжаться, и этот процесс будет периодически повторяться.

В рассматриваемой цепи энергия электрического поля переходит в энергию магнитного поля, и наоборот, т. е. в цепи происходят незатухающие колебания энергии, почему она и получила название колебательной цепи или колебательного контура. Изменения тока и напряжения подчиняются гармоническому синусоидальному закону (рис. 6-21), причем напряжение на пластинах конденсатора, равное в любой момент времени э. д. с. самоиндукции, сдвинуто от тока по фазе на четверть периода.

Изменение заряда на электродах конденсатора пропорционально изменению напряжения

$$dq = i dt = C du_c,$$

откуда ток в цепи

$$i = C \frac{du_c}{dt}$$

пропорционален производной напряжения по времени. Напряжение на зажимах конденсатора

$$u_c = -e_L = L \frac{di}{dt} \quad (6-29)$$

пропорционально производной тока по времени. Такая взаимная зависимость двух переменных величин возможна в том случае, если ток изменяется по синусоиде, а напряжение по косинусоиде.

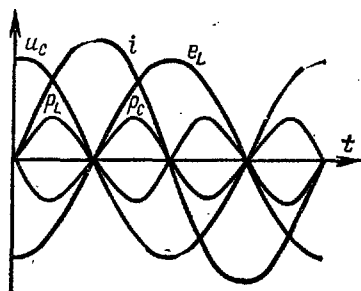


Рис. 6-21. Графики напряжения, тока и мощности колебательного контура.

Для определения частоты тока в цепи (f_0) напомним выражение амплитуды тока

$$I_m = U_{Cm} \omega_0 C = U_{Cm} 2\pi f_0 C. \quad (6-30)$$

Подставив это выражение в формулу (6-28), получим:

$$\frac{CU_{Cm}^2}{2} = \frac{LU_{Cm}^2 \cdot 4\pi^2 f_0^2 C^2}{2},$$

откуда

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (6-31)$$

Величина f_0 называется собственной частотой колебательного контура, а ω_0 — собственной угловой частотой контура.

Амплитуда тока в цепи (6-30) и (6-31)

$$I_m = \sqrt{\frac{CU_{Cm}^2}{L}} = \frac{U_{Cm}}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \frac{U_{Cm}}{z_B}.$$

Величина $\sqrt{\frac{L}{C}} = z_B$ имеет размерность сопротивления и называется волновым сопротивлением контура.

При наличии в цепи сопротивления r , не превышающего двойного волнового сопротивления контура, часть энергии при каждом колебании превращается в тепло, благодаря чему амплитуды тока и напряжения с каждым полупериодом уменьшаются, — происходит затухание колебаний. Если r больше указанного значения, то разряд конденсатора происходит без колебаний, т. е. а п е р и о д и ч е с к и: напряжение и заряд конденсатора постепенно уменьшаются до нуля.

Для получения незатухающих колебаний в контуре с C , L , r необходим источник питания переменного тока, сообщаящий контуру энергию, равную теряемой в его активном сопротивлении. Источник питания может соединяться с контуром последовательно или параллельно [последовательный колебательный контур (§ 6-9) или параллельный контур (§ 6-10)].

6-9. Резонанс напряжений

При синусоидальном токе

$$i = I_m \sin \omega t$$

в цепи с сопротивлением r , индуктивностью L и емкостью C (рис. 6-22) напряжение на зажимах ее состоит из трех слагающих (рис. 6-23): активного напряжения $U_a = Ir$, совпадающего по фазе с током, индуктивного $U_L = Ix_L$, опережающего ток на 90° , и емкостного напряжения $U_C = Ix_C$ отстающего по фазе от тока на 90° . Напряжение на зажимах цепи находится из прямоугольного треугольника (рис. 6-23),

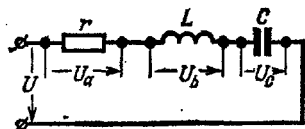


Рис. 6-22. Цепь с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью.

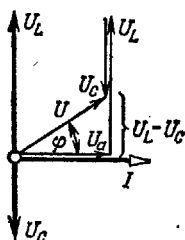


Рис. 6-23. Векторная диаграмма цепи с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью при $x_L > x_C$.

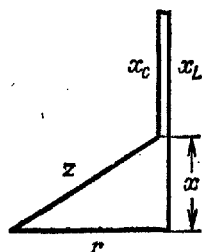


Рис. 6-24. Треугольник сопротивлений цепи с r , x_L и x_C при $x_L > x_C$.

одним катетом которого является вектор активного напряжения, а другим — разность векторов напряжения на индуктивности и на емкости. Следовательно, напряжение

$$U = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2}. \quad (6-32)$$

Заменив в (6-23) напряжения U_a , U_L и U_C их выражениями через ток и соответствующие сопротивления, получим:

$$U = \sqrt{(Ir)^2 + (Ix_L - Ix_C)^2} = I\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = Iz, \quad (6-33)$$

откуда напишем закон Ома для действующих значений:

$$I = \frac{U}{z}. \quad (6-34)$$

Полное сопротивление цепи

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = \sqrt{r^2 + x^2} \quad (6-35)$$

можно представить гипотенузой прямоугольного треугольника сопротивлений (рис. 6-24), который можно получить,

разделив стороны треугольника напряжений на ток I . При этом величина $x = x_L - x_C$, представляющая собой разность между индуктивным и емкостным сопротивлением, называется реактивным сопротивлением цепи.

Ток сдвинут по фазе от напряжения на зажимах цепи на угол φ , тангенс которого

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L - U_C}{U_a} = \frac{x_L - x_C}{r}.$$

При $x_L > x_C$, а следовательно, и при $U_L > U_C$ (рис. 6-23 и 6-24) ток отстает по фазе от напряжения на угол φ , при

$x_L < x_C$ и при $U_L < U_C$ ток опережает напряжение U .

При $x_L = x_C$ и, естественно, при $U_L = U_C$ (рис. 6-25 и 6-26) имеет место резонанс напряжений, при котором полное сопротивление цепи равно ее активному сопротивлению:

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = r.$$

При таком наименьшем полном сопротивлении цепи ($z = r$) и при неизменном напряжении U на ее зажимах ток цепи будет наибольшим:

$$I_p = U/r. \quad (6-36)$$

При резонансе реактивное сопротивление цепи равно нулю и ток совпадает по фазе с напряжением:

$$\operatorname{tg} \varphi = x/r = 0; \quad \varphi = 0.$$

Напряжение на индуктивности U_L и напряжение на емкости U_C , равные по величине, изменяясь в противофазе (рис. 6-25 и 6-27), компенсируют друг друга, а напряжение цепи равно активному напряжению.

Отношение напряжения на любом из реактивных участков при резонансе к напряжению цепи называется добротностью контура:

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{I_p x_L}{I_p r} = \frac{I_p x_C}{I_p r} = \frac{x_L}{r} = \frac{x_C}{r} = \frac{z_n}{r}. \quad (6-37)$$

Добротность показывает, во сколько раз напряжение U_L и U_C при резонансе больше напряжения на зажимах цепи U .

При больших значениях Q напряжения U_L и U_C значительно превышают напряжение U на зажимах цепи.

Равенство напряжений U_L и U_C при сдвиге их по фазе на полпериода указывает на то, что в любой момент времени напряжения на емкости и на индуктивности равны по величине, но противоположны по знаку ($u_L = -u_C$). Следовательно, в любой момент времени равны по величине и противоположны по знаку мгновенные мощности в реактивных участках $p_L = -p_C$ (рис. 6-27), так как $p_L = iu_L$, а $p_C = iu_C$.

Из этого следует, что увеличение энергии магнитного поля происходит исключительно за счет уменьшения энергии электрического поля, и наоборот, и на долю генератора остается лишь покрытие расхода энергии в активном сопротивлении.

Таким образом, резонанс напряжений характерен тем, что в цепи происходит периодический обмен энергией между магнитным полем и электрическим полем.

При резонансе напряжений

$$\omega L = 1/\omega C, \text{ или } \omega^2 LC = 1; \quad (6-38)$$

следовательно, угловая резонансная частота

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0, \quad (6-39)$$

а резонансная частота

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = f_0. \quad (6-40)$$

Иначе говоря, резонанс имеет место при частоте генератора, равной частоте собственных колебаний контура (цепи).

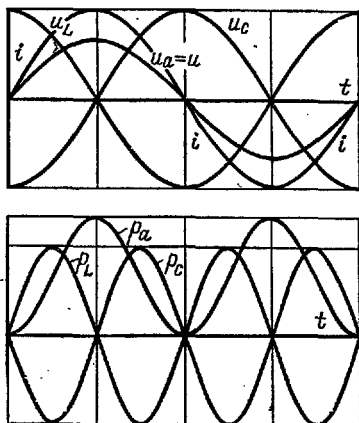
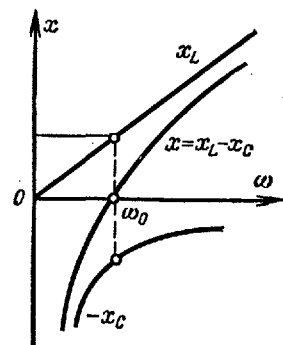


Рис. 6-27. Графики тока, напряжения и мощности при резонансе напряжений.

Подбор параметров цепи для получения в ней резонанса называется настройкой цепи в резонанс.

При резонансе величины ω , L и C связаны соотношением (6-38), из которого следует, что настройку цепи можно выполнить различно. Например, при неизменных ω и L — регулировкой емкости C , при неизменных L и C — изменением частоты ω питающего генератора, при неизменной ω — регулировкой L и C и т. д.

На рис. 6-28 даны кривые зависимости сопротивлений $x_L = \omega L$, $x_C = 1/\omega C$ и $x = x_L - x_C$ от частоты $\omega = 2\pi f$, называемые частотными характеристиками неразветвленной цепи.



Индуктивное сопротивление $x_L = \omega L$ увеличивается пропорционально частоте ω от 0 при $\omega = 0$ до ∞ при $\omega = \infty$. Емкостное сопротивление $x_C = 1/\omega C$ изменяется обратно пропорционально частоте от $-\infty$ до 0. Реактивное сопротивление $x = x_L - x_C$ при изменении частоты от $\omega = 0$ до резонансной частоты $\omega = \omega_0$ и далее до $\omega = \infty$ изменяется от $x = -\infty$ до $x = 0$ и далее до $x = \infty$.

Рис. 6-28. Частотные характеристики.

Если цепь с r , L и C находится под неизменным напряжением U , а частота ω изменяется, то изменяются все величины, определяющие режим ее работы. В частности, ток цепи $I = U/z = U/\sqrt{r^2 + x^2}$ при $\omega = 0$ и $\omega = \infty$ имеет нулевое значение, а при резонансной частоте $\omega = \omega_0$ имеет наибольшее значение $I = U/r$ (рис. 6-29).

Кривые тока $I = f(\omega)$, называемые резонансными, для последовательного контура при одинаковых U , L и C и двух значениях добротности контура Q_1 и $Q_2 > Q_1$ показаны на рис. 6-29, а. Те же зависимости приведены на рис. 6-29, б, но здесь по оси ординат отложены не абсолютные значения тока, а его относительные значения по отношению к резонансным значениям, т. е. $I/I_p = f(\omega)$.

Из этих кривых видно, что интенсивные колебания тока в контуре возникают только при частотах, близких к частоте собственных колебаний контура ω_0 , или, иначе, контур пропускает колебания определенного диапазона частот. Это свойство характеризуют полосой пропускания контура

или областью частот, в пределах которой ток в контуре имеет значение не меньше $I_p/\sqrt{2} = 0,707 I_p$.

Проведя прямую, параллельную оси абсцисс (рис. 6-29, б), с ординатой 0,707 и опустив перпендикуляры из точек а, б пересечения этой прямой в резонансной кривой, получим

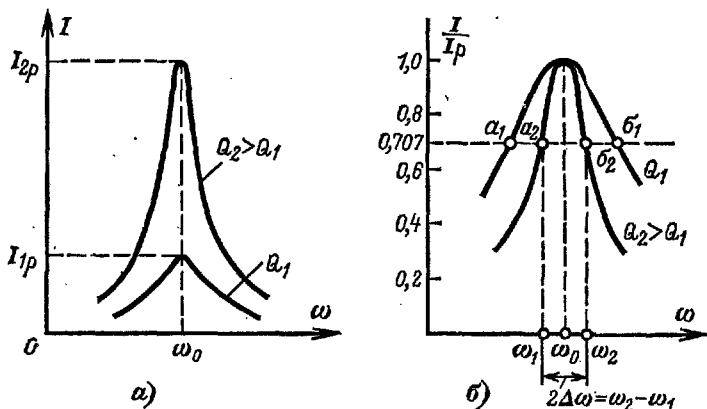


Рис. 6-29. Резонансные кривые тока при различной добротности контуров.

на оси абсцисс *границные частоты* ω_1 и ω_2 и *ширину полосы пропускания контура*

$$2\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1.$$

Из рис. 6-29 следует, что большим добротностям контура соответствует более узкая резонансная кривая и соответственно меньшая полоса пропускания контура $2\Delta\omega$.

Явление резонанса в электрических цепях широко используется в ряде областей и, в частности, в радиотехнике и электронике. Однако возникновение резонанса напряжений в цепях сильного тока, не соответствующее нормальному режиму работы установки может иметь опасные последствия.

6-10. Резонанс токов

а) Параллельный колебательный контур без потерь

В разветвленной цепи (рис. 6-30) с двумя ветвями, одна из которых обладает индуктивностью L , а другая емкостью C , при равенстве сопротивлений ветвей

$$\omega L = 1/\omega C$$

наступает *резонанс токов*.

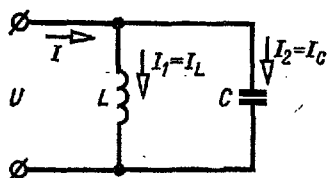
Из формулы следует, что резонанс в цепи можно получить подбором индуктивности, емкости или частоты, так как

$$L = 1/\omega^2 C; \quad C = 1/\omega^2 L \quad \text{и} \quad \omega = 1/\sqrt{LC} = \omega_0. \quad (6-41)$$

При резонансе токов токи в ветвях

$$I_1 = I_L = U/\omega L = I_2 = I_C = U\omega C$$

равны по абсолютной величине и изменяются, находясь в противофазе (рис. 6-31), так как ток I_L отстает по фазе от напряжения на 90° , а ток I_C опережает по фазе напряжение на 90° .



По первому закону Кирхгофа ток в неразветвленной части цепи (общий ток)

$$i = i_L + i_C,$$

но так как $i_C = -i_L$, то

$$i = i_L + i_C = i_L - i_L = 0,$$

т. е. общий ток равен нулю.

Рис. 6-30. Разветвленная цепь с индуктивностью и емкостью.

На рис. 6-32 даны кривые токов, напряжения и мощности.

Отсутствие в цепи активного сопротивления указывает на то, что энергия, запасенная в контуре, не рассеивается.

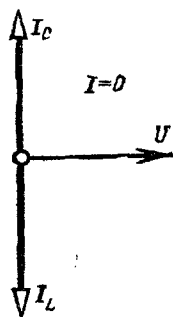


Рис. 6-31. Векторная диаграмма при резонансе токов при $r=0$.

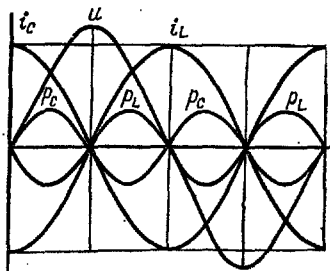


Рис. 6-32. Графики токов, напряжения и мощности при резонансе токов (при $r=0$).

В течение первой четверти периода (рис. 6-32) напряжение на конденсаторе от нуля увеличивается до максимума U_{Cm} и в электрическом поле его запасается энергия $W_{Cm} = CU_{Cm}^2/2$. В течение следующей четверти периода напря-

жение на конденсаторе уменьшается до нуля, происходит распад электрического поля и освобождение его энергии.

Ток в катушке в течение первой четверти периода от I_{L_m} уменьшается до нуля, происходит распад магнитного поля и освобождение его энергии. В течение следующей четверти периода ток в катушке увеличивается до I_{L_m} и энергия магнитного поля катушки увеличивается от нуля до максимума $W_{L_m} = LI_{L_m}^2/2$.

Из сказанного выше и рис. 6-32 нетрудно понять, что в течение первой четверти периода кинетическая энергия магнитного поля преобразуется в потенциальную энергию электрического поля, а в течение второй четверти периода, наоборот, происходит преобразование энергии электрического поля в энергию магнитного поля. Затем процесс периодического обмена энергии повторяется.

Обмена энергии между цепью и источником питания нет, так как ток в неразветвленной части цепи равен нулю.

б) Параллельный колебательный контур с потерями

Цепь рис. 6-33 состоит из параллельно соединенных катушки и конденсатора, находящихся под общим напряжением U .

Ток в катушке

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{U}{\sqrt{r_1^2 + x_{L1}^2}}.$$

Этот ток отстает по фазе от напряжения на угол φ_1 , тангенс которого

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = x_{L1}/r_1.$$

Ток катушки можно разложить на две слагающие, активную $I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1$, совпадающую по фазе с напряжением, и реактивную $I_{p1} = I_L = I_1 \sin \varphi_1$, отстающую по фазе от напряжения на угол $\pi/2$ (рис. 6-34).

Ток конденсатора

$$I_2 = I_C = \frac{U}{x_2} = \frac{U}{1/\omega C} = U\omega C.$$

Он опережает по фазе напряжение на угол $\pi/2$.

Общий ток найдем из прямоугольного треугольника токов (рис. 6-34), одним катетом которого является активная слагающая тока $I_a = I_{a1}$, а другим реактивная слагающая общего тока, равная разности реактивной слагающей

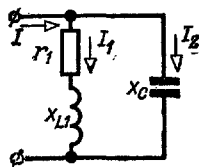


Рис. 6-33. Схема разветвленной цепи.

тока катушки и тока конденсатора $I_p = I_{p1} - I_2 = I_L - I_C$.

Таким образом, общий ток

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}.$$

Угол сдвига общего тока от напряжения определяется через его тангенс (рис. 6-34):

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_p}{I_a} = \frac{I_L - I_C}{I_{a1}}.$$

Ток в неразветвленной части цепи может отставать от напряжения на угол φ при $I_L > I_C$, или опережать его

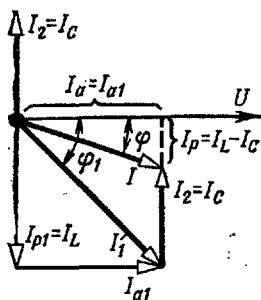


Рис. 6-34. Векторная диаграмма для разветвленной цепи.

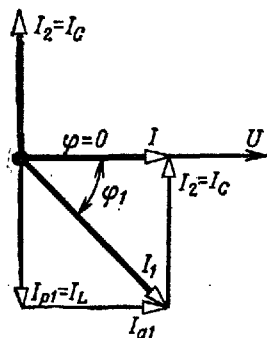


Рис. 6-35. Векторная диаграмма при резонансе токов.

при $I_L < I_C$, или, наконец, совпадать по фазе с напряжением (рис. 6-35) при $I_C = I_L$. В последнем случае в цепи наступает резонанс токов, при котором $I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = I_a$, а мощность $P = U \cos \varphi = UI$, так как $\varphi = 0$, а $\cos \varphi = 1$.

Таким образом, общий ток равен активной составляющей тока катушки. При этом общий ток всегда меньше тока в катушке, так как активная составляющая тока катушки всегда меньше тока катушки ($I_{a1} < I_1$).

Отношение тока в контуре или в катушке ($I_1 \approx I_2$) к общему току при резонансе ($I_{\text{рез}}$)

$$I_1 / I_{\text{рез}} = Q,$$

представляющее собой добротность контура, показывает,

во сколько раз ток в параллельном контуре при резонансе больше общего тока в подводящих проводах.

В этом случае максимальная мощность, затрачиваемая на получение магнитного поля (UI_L), равна максимальной мощности, затрачиваемой на получение электрического поля (UI_C), а следовательно, равны и максимальные значения энергии в магнитном и электрическом полях цепи $W_{Lm} = W_{Cm}$. Как и в рассмотренном выше колебательном контуре, в течение одной четверти периода энергия, запасаемая в электрическом поле, целиком получается от магнитного поля, а в течение второй четверти периода энергия, запасаемая в магнитном поле, целиком получается от электрического поля. От генератора в цепь поступает только энергия, расходуемая в активном сопротивлении. Так как реактивные слагающие тока компенсируют друг друга, то в цепи генератора проходит только активный ток, обусловленный потерями энергии в активном сопротивлении. На рис. 6-36 представлены кривые токов напряжений и мощности цепи (рис. 6-33) для случая резонанса токов.

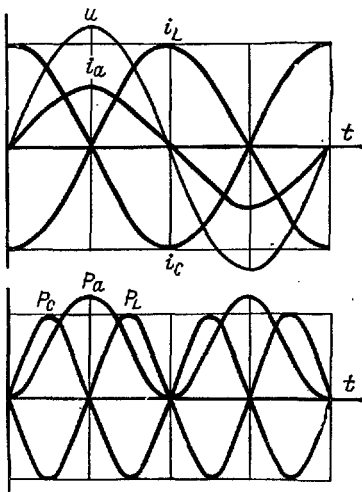


Рис. 6-36. Графики токов, напряжения и мощности для разветвленной цепи для случая $I_C = I_L$.

6-11. Коэффициент мощности

Для полного использования генератора он должен работать при номинальном напряжении U_n с номинальным током I_n и с $\cos \varphi = 1$. В этом случае генератор развивает наибольшую активную мощность, равную его полной номинальной мощности,

$$P = U_n I_n \cos \varphi = U_n I_n = S_n. \quad (6-42)$$

Уменьшение $\cos \varphi$ вызывает пропорциональное уменьшение активной мощности, т. е. неполное использование номинальной мощности генератора.

У приемника энергии, работающего при неизменном номинальном напряжении U_n и с постоянной активной мощностью P , ток изменяется обратно пропорционально $\cos \varphi$, так как

$$I = \frac{P}{U_n \cos \varphi} = I_0 \frac{1}{\cos \varphi} = \text{const} \frac{1}{\cos \varphi}.$$

Следовательно, уменьшение $\cos \varphi$ вызывает увеличение тока и увеличение мощности потерь на нагревание проводов $I^2 r$.

По указанным соображениям стремятся повышать $\cos \varphi$ каждой установки до значения, близкого к единице.

У наиболее распространенных асинхронных двигателей $\cos \varphi$ изменяется от 0,1—0,3 при холостом ходе до 0,8—0,85 при номинальной нагрузке. Следовательно, для повышения $\cos \varphi$ установки необходимо увеличивать нагрузку электродвигателей и включать параллельно им конденсаторы. В этом случае мощность, затрачиваемая на образование магнитного поля, будет получаться не от станции, а от конденсатора при распаде его электрического поля и наоборот.

Пример 6-5. Электродвигатель мощностью 10 кВт работает при напряжении 240 В с $\cos \varphi = 0,6$. Частота $f = 50$ Гц. Определить емкость конденсатора, необходимого для повышения $\cos \varphi$ установки до значения 0,9

Решение.

Ток электродвигателя

$$I_1 = \frac{P}{U \cos \varphi_1} = \frac{10\,000}{240 \cdot 0,6} = 69 \text{ А.}$$

По тригонометрическим таблицам определяем:

$$\varphi_1 = 53^\circ 10' \quad \text{и} \quad \sin \varphi_1 = 0,8.$$

Реактивная слагающая тока электродвигателя

$$I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1 = 69 \cdot 0,8 = 55,5 \text{ А.}$$

Если параллельно двигателю включен конденсатор, то $\cos \varphi_2 = 0,9$, чему соответствует $\varphi_2 = 25^\circ 50'$ и $\sin \varphi_2 = 0,436$.

Ток, идущий из сети,

$$I_2 = \frac{P}{U \cos \varphi_2} = \frac{10\,000}{240 \cdot 0,9} = 46,2 \text{ А.}$$

В этом случае реактивная слагающая тока

$$I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2 = 46,2 \cdot 0,436 = 20,2 \text{ А.}$$

Уменьшение реактивной слагающей тока при включении конденсатора, равное току конденсатора I_C ,

$$I_C = I_{p1} - I_{p2} = 55,5 - 20,2 = 35,3 \text{ А.}$$

Реактивное сопротивление конденсатора

$$x_C = \frac{U}{I_C} = \frac{240}{35,3} = 6,8 \text{ Ом.}$$

Емкость конденсатора

$$C = \frac{1}{x_C 2\pi f} = \frac{1}{6,8 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,000460 \text{ Ф} = 460 \text{ мкФ.}$$

6-12. Активная и реактивная энергия

Электрическая энергия, израсходованная в цепи переменного тока за время t , называется активной энергией. При неизменной мощности активная энергия

$$W_a = Pt = UI \cos \varphi t. \quad (6-43)$$

Если мощность изменяется, то активную энергию определяют как сумму слагающих

$$P_1 t_1 + P_2 t_2 + \dots = W_{a1} + W_{a2} + \dots = W_a;$$

каждая из них получена цепью за промежуток времени t_1 , t_2 , t_3 , в течение его мощность неизменна.

Произведение неизменной реактивной мощности Q и времени t называется реактивной энергией

$$W_p = Qt = UI \sin \varphi t. \quad (6-44)$$

Если реактивная мощность изменяется, то реактивная энергия определяется как сумма слагаемых

$$Q_1 t_1 + Q_2 t_2 + \dots = W_{p1} + W_{p2} + \dots = W_p.$$

Если активная и реактивная мощности постоянны, то отношение

$$\begin{aligned} \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_p^2}} &= \frac{UI \cos \varphi t}{\sqrt{(UI \cos \varphi t)^2 + (UI \sin \varphi t)^2}} = \\ &= \frac{UI \cos \varphi t}{UIt \sqrt{\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi}} = \cos \varphi \end{aligned}$$

равно коэффициенту мощности.

При изменяющихся мощностях, измерив за определенный промежуток времени активную и реактивную энергию соответственно счетчиками активной и реактивной энергии, найдем отношение

$$\frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_p^2}} = \cos \varphi_{cp},$$

называемое средним коэффициентом мощности установки. Он является важным технико-экономическим показателем работы установки.

Пример 6-6. Показания счетчика активной энергии в начале и конце месяца были соответственно 2 326 и 2 476 кВт·ч. Показания реактивного счетчика были соответственно 1 673 и 1 773 квар·ч. Определить среднее значение коэффициента мощности.

Решение.

Израсходованная за месяц активная энергия

$$W_a = 2\,476 - 2\,326 = 150 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

израсходованная за то же время реактивная энергия

$$W_p = 1\,773 - 1\,673 = 100 \text{ квар} \cdot \text{ч};$$

$$\cos \varphi_{\text{ср}} = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_p^2}} = \frac{150}{\sqrt{150^2 + 100^2}} = 0,83.$$

6-13. Лабораторная работа. Цепь переменного тока с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью

Перед выполнением работы ознакомиться с содержанием § 6-9.

П л а н р а б о т ы

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием, необходимым для выполнения работы; записать их основные технические данные.
2. Собрать схему (рис. 6-37) и показать ее руководителю.

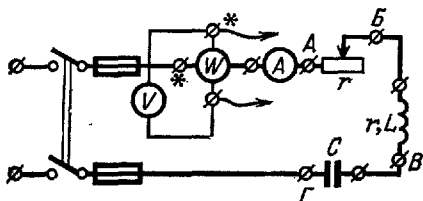


Рис. 6-37. Схема для выполнения лабораторной работы.

3. Установить $x_L > x_C$, измерить напряжение и активную мощность в каждом участке цепи (между точками АБ, БВ и ВГ) и во всей цепи (между точками АГ)
4. По полученным данным вычислить для каждого участка и всей цепи

$$r = \frac{P}{I^2}; \quad z = \frac{U}{I}; \quad x = \sqrt{z^2 - r^2}; \quad U_a = Ir; \quad U_p = Ix; \quad \operatorname{tg} \varphi = x/r.$$

5. Результаты измерений и расчетов записать в табл. 6-1.
6. По полученным данным построить в масштабе векторную диаграмму напряжений и диаграмму сопротивлений.
7. Установить $x_L = x_C$ (по наибольшему току в цепи) и для этого случая (резонанс напряжений) повторить все указанные выше измерения и вычисления. Результаты измерений и расчетов записать в табл. 6-1.

№ п/п.	При соотношении	Участок цепи	U	I	P	r	z	x	U_a	U_p	$\lg \varphi$	$\angle \varphi$
			В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	В	В	—	—
1	$x_L > x_C$	Реостат Катушка Конденсатор Вся цепь										
2	$x_L = x_C$	Реостат Катушка Конденсатор Вся цепь										
3	$x_L < x_C$	Реостат Катушка Конденсатор Вся цепь										

8. По полученным данным построить в масштабе векторную диаграмму напряжений и диаграмму сопротивлений.

9. Повторить все измерения и вычисления при $x_L < x_C$. Результаты записать в табл. 6-1. Построить в масштабе векторную диаграмму напряжений и диаграмму сопротивлений.

10. Дать заключение о проделанной работе.

6-14. Лабораторная работа. Параллельное соединение катушки и конденсатора

Перед выполнением работ ознакомиться с содержанием § 6-10 и 6-11.

П л а н р а б о т ы

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для проведения работы. Записать основные технические характеристики измерительных приборов и оборудования.

2. Собрать схему (рис. 6-38) и показать ее руководителю.

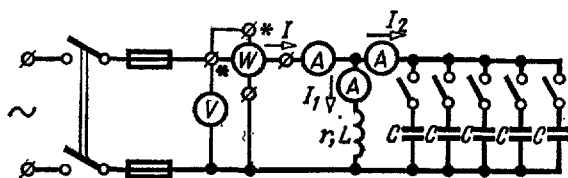


Рис. 6-38. Схема для выполнения лабораторной работы.

3. Увеличивая емкость конденсатора (при неизменных r и L катушки), записать показания измерительных приборов. По полученным данным определить: r_1 ; x_C ; I_{a1} ; I_{p1} ; $\cos \varphi_1$; $\cos \varphi$; $\angle \varphi$.

Показания приборов и результаты расчета записать в табл. 6-2.

Таблица 6-2

U	I	I_1	I_2	P	z_1	x_C	I_{a1}	I_{p1}	$\cos \varphi_1$	$\sin \varphi_1$	$\cos \varphi$	$\angle \varphi$
В	А	А	А	Вт	Ом	Ом	А	А	—	—	—	—

4. Пользуясь полученными данными, построить графики

$$I_1 = f(x_C); \quad I_2 = f(x_C); \quad I = f(x_C) \quad \text{и} \quad \cos \varphi = f(x_C).$$

5. Для трех случаев, когда $I_{p1} > I_2$; $I_{p1} = I_2$; $I_{p1} < I_2$, построить в масштабе векторную диаграмму.

6. Дать заключение о проделанной работе.

Глава седьмая.

Трехфазные цепи

7-1. Трехфазные системы

Трехфазной (многофазной) системой электрических цепей называется система, состоящая из трех (нескольких) электрических цепей переменного тока одной частоты, э. д. с. которых имеют разные начальные фазы.

Трехфазная система переменного тока получила широчайшее распространение, как система, обеспечивающая более экономичную передачу энергии по сравнению с однофазной системой. Кроме того, она позволяет создать простые по устройству и надежные в эксплуатации генераторы, двигатели и трансформаторы.

Изобретение трехфазной системы и создание трехфазного генератора, трехфазного электродвигателя и трехфазного трансформатора принадлежит выдающемуся русскому инженеру М. О. Доливо-Добровольскому.

Отдельные цепи трехфазной системы сокращенно называются фазами. Трехфазную систему электрических цепей, соединенных друг с другом, называют трехфазной цепью.

Совокупность токов, напряжений или э. д. с., действующих в фазах трехфазной цепи, называется трехфазной системой токов, напряжений или э. д. с.

Простейший трехфазный генератор (рис. 7-1) устроен аналогично однофазному (рис. 5-2), отличаясь от последнего тем, что на якоре расположены три одинаковые обмотки (фазы), начала и концы которых обозначаются соответственно буквами A, B, C, X, Y, Z . Оси обмоток сдвинуты в пространстве одна относительно другой на равные углы $2\pi/3 = 120^\circ$. Поэтому индуцированные в обмотках э. д. с. с одинаковыми амплитудами сдвинуты по

фазе относительно друг друга на углы 120° , или на $1/3$ периода. Такая система трех э. д. с. называется *симметричной*. Наоборот, при неравенстве амплитуд э. д. с. или неравенстве углов сдвига между ними система э. д. с. будет *несимметричной*.

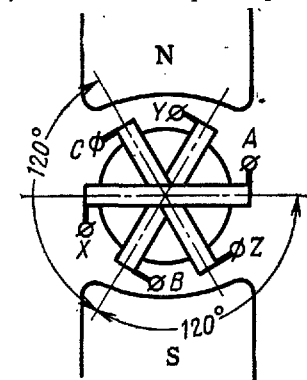


Рис. 7-1. Простейший генератор трехфазного тока.

Электродвижущая сила третьей фазы (C) отстает от э. д. с. e_A на $2/3$ периода или опережает э. д. с. e_A на $1/3$ периода, поэтому ее выражение

$$e_C = E_m \sin(\omega t - 4\pi/3) = E_m \sin(\omega t + 2\pi/3). \quad (7-3)$$



М. О. Доливо-Добровольский (1862—1919).

Приняв за начало отсчета времени ($t = 0$) начало периода э. д. с. в первой фазе (A), получим ее выражение

$$e_A = E_m \sin \omega t. \quad (7-1)$$

Электродвижущая сила второй фазы (B) отстает от э. д. с. первой фазы e_A на $1/3$ периода, поэтому она запишется:

$$e_B = E_m \sin(\omega t - 2\pi/3). \quad (7-2)$$

Графики э. д. с. и их векторная диаграмма даны на рис. 7-2 и 7-3.

Положительные направления э. д. с. в обмотках генератора принято считать от концов обмоток X, Y, Z к их началам A, B, C .

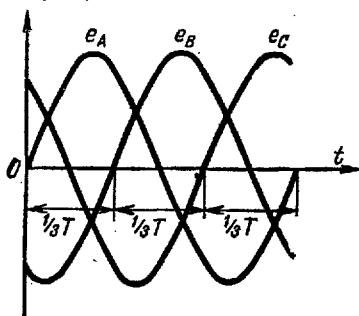


Рис. 7-2. График симметричных э. д. с. трехфазной системы.

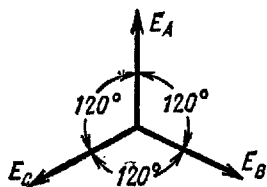


Рис. 7-3. Векторная диаграмма симметричных э. д. с.

Соединяя каждую обмотку трехфазного генератора с отдельным приемником энергии (рис. 7-4), получим несвязанную трехфазную систему с шестью проводами. Она является неэкономичной и поэтому на практике не применяется. Обмотки трехфазного генератора соединяются звездой или треугольником,

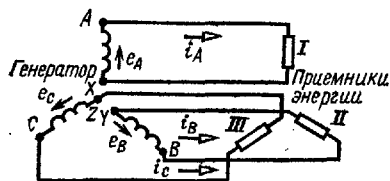


Рис. 7-4. Несвязанная трехфазная система.

что дает возможность вместо шести проводов применять три или четыре провода.

Для трехфазных цепей стандартными являются напряжения: 127, 220, 380, 660 В и выше.

7-2. Соединение обмоток генератора звездой

При соединении обмоток звездой концы обмоток X, Y, Z соединяются в одну точку, называемую нулевой точкой или нейтралью генератора (рис. 7-5). В четырехпроводной системе к нейтрали присоединяется нейтральный или нулевой провод. К началам обмоток генератора присоединяются три линейных провода.

Напряжения между началами и концами фаз, или, что то же, напряжения между каждым из линейных проводов

и нулевым называются ф а з н ы м и н а п р я ж е н и я м и и обозначаются U_A, U_B, U_C или в общем виде U_ϕ . Пренебрегая падением напряжения в обмотках генератора, можно считать фазные напряжения равными соответствующим э. д. с., индуктированным в обмотках генератора.

Напряжения между началами обмоток, или, что то же, между линейными проводами, называются л и н е й н ы м и н а п р я ж е н и я м и и обозначаются U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} или в общем виде U_λ .

Установим соотношение между линейными и фазными напряжениями при соединении обмоток генератора звездой. Так как конец первой фазы X соединен не с началом второй фазы,



Рис. 7-5. Схема соединения обмоток генератора звездой.

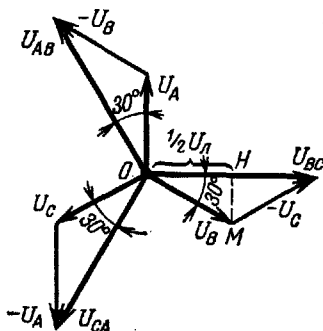


Рис. 7-6. Векторная диаграмма напряжений трехфазной цепи.

а с концом ее Y , что аналогично встречному соединению двух источников э. д. с. при постоянном токе, то мгновенное значение линейного напряжения между проводами A и B будет равно разности соответствующих фазных напряжений, т. е.

$$u_{AB} = u_A - u_B;$$

аналогично мгновенные значения других линейных напряжений

$$u_{BC} = u_B - u_C \quad \text{и} \quad u_{CA} = u_C - u_A.$$

Таким образом, мгновенное значение линейного напряжения равно алгебраической разности мгновенных значений соответствующих фазных напряжений.

Так как u_A, u_B и u_C изменяются по синусоидальному закону и имеют одинаковую частоту, то и линейные напряжения u_{AB}, u_{BC} и u_{CA} будут изменяться синусоидально, причем действующие значения линейных напряжений можно определить из векторной диаграммы (рис. 7-6):

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_A - \bar{U}_B, \quad \bar{U}_{BC} = \bar{U}_B - \bar{U}_C \quad \text{и} \quad \bar{U}_{CA} = \bar{U}_C - \bar{U}_A.$$

Из сказанного следует, что *вектор линейного напряжения равен разности векторов соответствующих фазных напряжений*.

Фазные напряжения u_A , u_B и u_C сдвинуты друг от друга на 120° . Для определения вектора линейного напряжения $\vec{U}_{AB}$ из вектора напряжения $\vec{U}_A$ нужно геометрически вычесть вектор $\vec{U}_B$, или, что то же, прибавить равный по величине и обратный по знаку вектор $-\vec{U}_B$.

Аналогично вектор линейного напряжения $\vec{U}_{BC}$ получим как разность векторов напряжений $\vec{U}_B$ и $\vec{U}_C$ и вектор линейного $\vec{U}_{CA}$ напряжения как разность векторов $\vec{U}_C$ и $\vec{U}_A$.

Опуская перпендикуляр из конца произвольно взятого вектора фазного напряжения, например U_B , на вектор линейного напряжения U_{BC} получим прямоугольный треугольник ОНМ, из которого следует, что

$$\frac{1}{2} U_\phi = U_\phi \cos 30^\circ = U_\phi \frac{\sqrt{3}}{2},$$

откуда

$$U_\Delta = \sqrt{3} U_\phi. \quad (7-4)$$

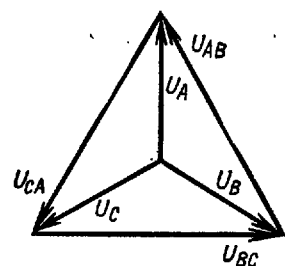


Рис. 7-7. Векторная диаграмма напряжений при соединении обмоток генератора звездой.

Из векторной диаграммы (рис. 7-6) и последней формулы следует, что *действующее значение линейного напряжения в $\sqrt{3}$ раз больше действующего значения фазного напряжения и что линейное напряжение U_{AB} на 30° опережает фазное напряжение U_A ; на такой же угол линейное напряжение U_{BC} опережает фазное напряжение U_B и напряжение U_{CA} — фазное напряжение U_C .*

Смежные, линейные напряжения сдвинуты друг относительно друга на такие же углы (120°), как и смежные фазные напряжения. *Звезда векторов линейных напряжений повернута в положительную сторону относительно звезды векторов фазных напряжений на угол 30° .*

Необходимо обратить внимание на то, что полученные соотношения между линейными и фазными напряжениями имеют место только при симметричной системе напряжений.

Так как векторы линейных напряжений определяются как разности векторов фазных напряжений, то, соединив концы векторов фазных напряжений, образующих звезду, получим треугольник векторов линейных напряжений (рис. 7-7).

Пример 7-1. Определить линейное напряжение генератора, если фазное напряжение его 127 и 220 В.

Решение.

$$U_{\Delta} = \sqrt{3} U_{\phi} = 1,73 U_{\phi} = 1,73 \cdot 127 = 220 \text{ В.}$$

Если фазное напряжение 220 В, то

$$U_{\Delta} = \sqrt{3} U_{\phi} = 1,73 \cdot 220 = 380 \text{ В.}$$

7-3. Соединение обмоток генератора треугольником

При соединении обмоток трехфазного генератора треугольником (рис. 7-8) конец первой обмотки X соединяется с началом второй обмотки B , конец второй обмотки Y соединяется с началом третьей обмотки C и конец третьей обмотки Z с началом первой A . Три линейных провода,

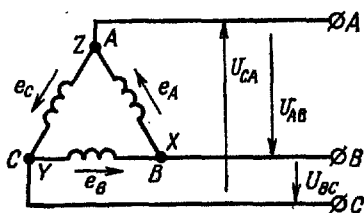


Рис. 7-8. Схема соединения обмоток генератора треугольником.

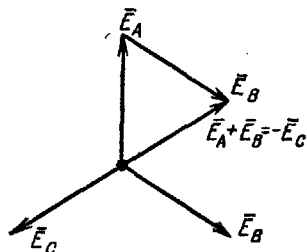


Рис. 7-9. Векторная диаграмма э. д. с. при соединении генератора треугольником.

идущих к приемникам энергии, присоединяются к началам фаз A , B и C .

Из рис. 7-8 ясно, что при таком соединении обмоток фазные напряжения равны линейным, т. е.

$$U_{AB} = U_A; \quad U_{BC} = U_B; \quad U_{CA} = U_C. \quad (7-5)$$

При соединении треугольником три фазы генератора образуют замкнутый контур с весьма малым сопротивлением. Очевидно, такое соединение возможно только в том случае, если сумма э. д. с., действующих в этом контуре, будет равна нулю, так как в противном случае в контуре даже при отсутствии нагрузки возникнет значительный ток, могущий вызвать перегрев генератора.

Сумма трех симметричных э. д. с., действующих в обмотках генератора, равна нулю. В этом легко убедиться, складывая векторы э. д. с. На рис. 7-9 даны три вектора

э. д. с. Складывая E_A и E_B , получаем вектор, равный и противоположный вектору $\bar{E}_C$, т. е.

$$\bar{E}_A + \bar{E}_B = -\bar{E}_C,$$

а следовательно, сумма трех векторов э. д. с. равна нулю, т. е.

$$\bar{E}_A + \bar{E}_B + \bar{E}_C = 0. \quad (7-6)$$

Опасно неправильное соединение обмоток генератора треугольником. На рис. 7-10 дана одна из возможных неправильных схем соединения, в которой конец первой фазы

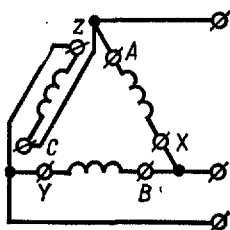


Рис. 7-10. Неправильная схема соединения обмоток генератора треугольником.

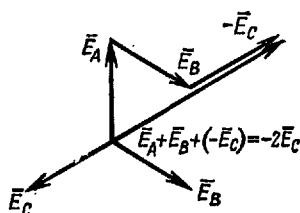


Рис. 7-11. Векторная диаграмма э. д. с. генератора, соединенного по схеме рис. 7-10.

X правильно соединен с началом второй фазы B , но конец второй фазы Y соединен не с началом третьей фазы C , а с ее концом Z , и начало третьей фазы C соединено с началом первой фазы A , вследствие чего э. д. с. E_C не складывается с остальными э. д. с., а вычитается из их суммы. Результирующая э. д. с. может быть определена из векторной диаграммы рис. 7-11, на которой произведено сложение векторов $\bar{E}_A$, $\bar{E}_B$ и $-\bar{E}_C$. Сумма этих трех векторов, как видно из диаграммы, равна удвоенному вектору $\bar{E}_C$, т. е.

$$\bar{E}_A + \bar{E}_B - \bar{E}_C = -2\bar{E}_C.$$

Таким образом, в этом случае э. д. с. замкнутого контура по абсолютной величине равна удвоенному значению фазной э. д. с., что при малом сопротивлении контура (обмоток генератора) равносильно короткому замыканию.

7-4. Соединение приемников энергии звездой

Приемники энергии, так же как и обмотки генератора, могут соединяться звездой, при этом трехфазная система может быть четырехпроводной (при осветительной нагрузке) или трехпроводной (при силовой нагрузке).

В четырехпроводной трехфазной системе лампы включаются между нейтральным проводом и каждым из линейных

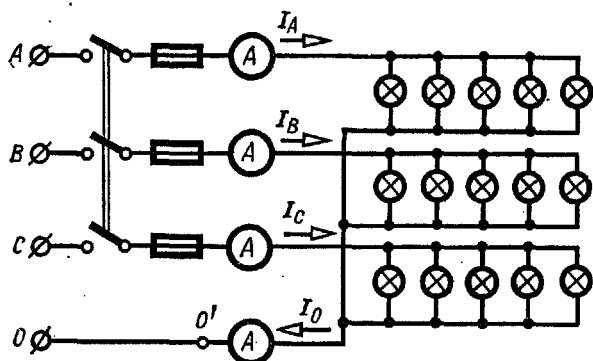


Рис. 7-12. Схема соединения звездой с нейтральным проводом.

проводов (рис. 7-12), причем номинальное напряжение ламп должно быть равно фазному напряжению сети.

При этом условия работы приемников энергии остаются теми же, что и в однофазной системе, так как нейтральный провод обеспечивает равенство фазных напряжений генератора и соответствующих фазных напряжений приемников.

Как видно из рис. 7-12, токи в линейных проводах равны токам в соответствующих фазах приемников или генератора, т. е.

$$I_n = I_\phi. \quad (7-7)$$

Определение фазных токов приемников производится так же, как и в однофазных цепях переменного тока, т. е.

$$I_A = \frac{U_A}{z_A}; \quad I_B = \frac{U_B}{z_B}; \quad I_C = \frac{U_C}{z_C}.$$

Углы сдвига токов относительно фазных напряжений определяются из формул

$$\cos \varphi_A = \frac{r_A}{z_A}; \quad \cos \varphi_B = \frac{r_B}{z_B}; \quad \cos \varphi_C = \frac{r_C}{z_C}$$

или

$$\operatorname{tg} \varphi_A = \frac{x_A}{r_A}; \quad \operatorname{tg} \varphi_B = \frac{x_B}{r_B}; \quad \operatorname{tg} \varphi_C = \frac{x_C}{r_C}.$$

Мгновенное значение тока в нейтральном проводе согласно первому закону Кирхгофа равно сумме мгновенных значений фазных токов, т. е.

$$i_0 = i_A + i_B + i_C.$$

Действующее значение тока в нейтральном проводе можно определить путем геометрического сложения векторов фазных токов, т. е.

$$I_0 = I_A + I_B + I_C. \quad (7-8)$$

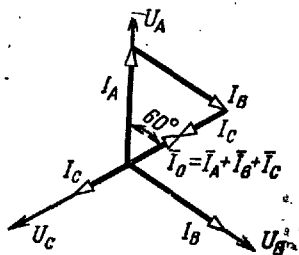
Пример 7-2. Фазное напряжение генератора $U_{\phi} = 125$ В, сопротивления фаз приемника $z_A = z_B = r_A = r_B = 12,5$ Ом, $z_C = r_C = 25$ Ом. Найти фазные токи.

Решение.

$$I_A = I_B = \frac{125}{12,5} = 10 \text{ А};$$

$$I_C = \frac{125}{25} = 5 \text{ А}.$$

Рис. 7-13. Векторная диаграмма четырехпроводной трехфазной цепи при активной нагрузке.



На рис. 7-13 даны векторы фазных напряжений и фазных токов, а также произведено сложение фазных токов. В результате сложения получен ток в нейтральном проводе $I_0 = 5$ А, отстающий по фазе от U_A на угол $\varphi_0 = 60^\circ$.

Нулевой провод может иметь сечение, равное сечению линейных проводов, или в 2—3 раза меньше, так как обычно ток в нейтральном проводе бывает меньше, чем токи в линейных проводах.

Следует еще раз отметить, что нейтральный провод при любых нагрузках фаз обеспечивает равенство фазных напряжений электроприемников. В случае же обрыва нейтрального провода при неодинаковых сопротивлениях фаз приемников энергии напряжения на отдельных фазах приемников будут различными. На некоторых фазах (с меньшим сопротивлением) напряжение уменьшится, а на

других увеличится по сравнению с нормальным, что является недопустимым. Особенно опасно, если при обрыве нулевого провода в одной из фаз произойдет короткое замыкание. При этом напряжение в других фазах увеличится в $\sqrt{3}$ раз, и все лампы, включенные в этих фазах, перегорят. По указанной причине во избежание разрыва нейтрального провода в нем не устанавливают предохранители и выключатели.

Если нагрузка трех фаз приемника одинакова (двигатели) то фазные токи будут равны между собой и сдвинуты на одинаковые углы от соответствующих фазных напряжений, т. е. система фазных токов будет также симметрична. В этом случае ток в нейтральном проводе, равный геометрической сумме фазных токов, будет равен нулю. Разумеется, что в этом случае нейтральный провод не нужен.

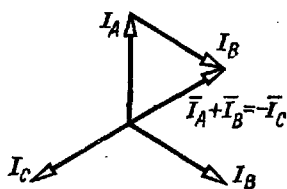


Рис. 7-14. Симметричные токи трехфазной цепи.

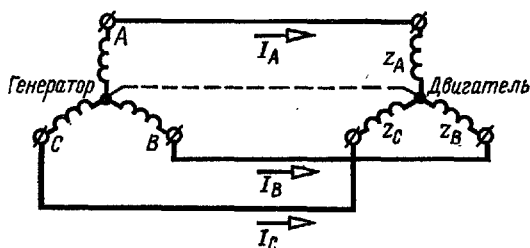


Рис. 7-15. Схема соединения трехфазного генератора и электроприемника звездой.

Складывая векторы фазных токов I_A и I_B (рис. 7-14), получаем вектор, равный и противоположный вектору I_C , т. е.

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B = -\bar{I}_C,$$

а сумма векторов трех токов равна нулю:

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0.$$

Расчет симметричной трехфазной цепи сводится к расчету одной фазы.

Если приемник энергии, соединенный звездой (рис. 7-15), имеет одинаковые сопротивления фаз, то фазное напряжение

$$U_\phi = \frac{U_\Delta}{\sqrt{3}}. \quad (7-9)$$

Фазный ток

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{z_{\phi}}. \quad (7-10)$$

Косинус угла сдвига фазного тока относительно фазного напряжения

$$\cos \varphi_{\phi} = r_{\phi} / z_{\phi}. \quad (7-11)$$

Синус и тангенс того же угла

$$\sin \varphi_{\phi} = \frac{x_{\phi}}{z_{\phi}}; \quad \operatorname{tg} \varphi_{\phi} = \frac{x_{\phi}}{r_{\phi}}. \quad (7-12)$$

Активная, реактивная и полная мощности одной фазы определяются выражениями:

$$P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi}; \quad Q_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi_{\phi}; \quad S_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi}. \quad (7-13)$$

При симметричной системе напряжений и токов мощности трех фаз определяются выражениями:

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi}; \quad (7-14)$$

$$Q = 3Q_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi_{\phi}; \quad (7-15)$$

$$S = 3S_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi}. \quad (7-16)$$

Приняв во внимание, что при соединении приемников энергии звездой $I_{\phi} = I_{\lambda}$, а $U_{\phi} = U_{\lambda} / \sqrt{3}$, получим выражение для активной мощности:

$$P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = \frac{3}{\sqrt{3}} U_{\lambda} I_{\lambda} \cos \varphi_{\phi} = \sqrt{3} U_{\lambda} I_{\lambda} \cos \varphi_{\phi}; \quad (7-17)$$

для реактивной мощности

$$Q = \sqrt{3} U_{\lambda} I_{\lambda} \sin \varphi_{\phi} \quad (7-18)$$

и для полной мощности

$$S = \sqrt{3} U_{\lambda} I_{\lambda}. \quad (7-19)$$

При несимметричной системе напряжений или при неодинаковой (неравномерной) нагрузке фаз приемников активная и реактивная мощности трехфазной системы определяются как суммы мощностей отдельных фаз.

Пример 7-3. Трехфазный генератор, соединенный звездой, имеет фазное напряжение 220 В. Приемник имеет активное сопротивление фазы 6 Ом и индуктивное 8 Ом. Определить линейное напряжение, фазный и линейный токи и активную мощность приемника энергии.

Решение.

Линейное напряжение

$$U_{\lambda} = \sqrt{3} U_{\phi} = 1,73 \cdot 220 \text{ В} = 380 \text{ В}.$$

Полное сопротивление фазы приемника

$$z_{\phi} = \sqrt{r_{\phi}^2 + x_{\phi}^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10 \text{ Ом.}$$

Фазный ток

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{z_{\phi}} = \frac{220}{10} = 22 \text{ А.}$$

При соединении приемников энергии звездой фазный ток равен линейному $I_{\text{л}} = 22 \text{ А}$.

Косинус угла сдвига фазного тока относительно фазного напряжения

$$\cos \varphi_{\phi} = \frac{r_{\phi}}{z_{\phi}} = \frac{6}{10} = 0,6.$$

Активная мощность трехфазной цепи

$$P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi = 1,73 \cdot 380 \cdot 22 \cdot 0,6 = 8,7 \text{ кВт.}$$

Пример 7-4. Трехфазный двигатель, соединенный звездой, подключенный к сети с напряжением 380 В, работает с мощностью 10 кВт и $\cos \varphi = 0,8$. Определить ток двигателя.

Решение.

Мощность в цепи питания двигателя

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

откуда ток

$$I_{\text{л}} = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\text{л}} \cos \varphi} = \frac{10\,000}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,8} = 19 \text{ А.}$$

7-5. Соединение приемников энергии треугольником

При соединении приемников энергии треугольником (рис. 7-16) отдельные фазы приемника присоединяются к линейным проводам, идущим от генератора. При этом каждая фаза приемника непосредственно включается на линейное напряжение, которое в то же время будет и фазным напряжением, т. е.

$$U_A = U_{AB}; \quad U_B = U_{BC}; \quad U_C = U_{CA}.$$

В этом случае фазные напряжения (в отличие от схемы соединения звездой) не зависят от сопротивлений фаз приемника.

За положительное направление фазных токов выбираем направление от A' к B' , от B' к C' и от C' к A' . За положительное направление линейных токов принимаем направление от генератора к приемнику.

По первому закону Кирхгофа для мгновенных значений токов для точки A' можно написать:

$$i_A + i_{CA} = i_{AB},$$

откуда

$$i_A = i_{AB} - i_{CA}.$$

Аналогично для точки B'

$$i_B = i_{BC} - i_{AB}$$

и для точки C'

$$i_C = i_{CA} - i_{BC}.$$

Таким образом, мгновенное значение линейного тока равно алгебраической разности мгновенных значений фазных токов тех фаз, которые соединены с данным проводом.

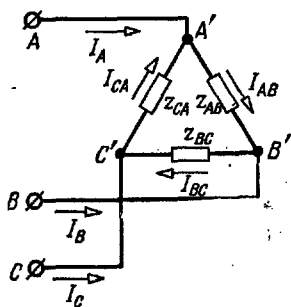


Рис. 7-16. Соединение электроприемников треугольником.

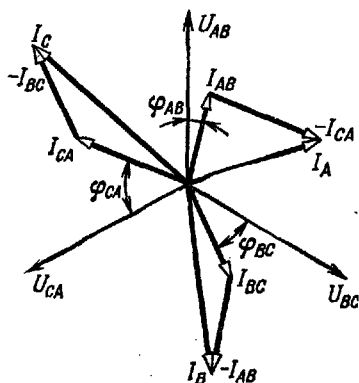


Рис. 7-17. Векторная диаграмма при соединении электроприемников треугольником.

Из сказанного следует, что вектор линейного тока равен разности векторов соответствующих фазных токов, т. е.

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA}; \quad \bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB} \quad \text{и} \quad \bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}. \quad (7-20)$$

На диаграмме (рис. 7-17) векторы линейных токов получены как разности векторов соответствующих фазных токов, причем все векторы проведены из общего начала. Иногда для большей наглядности векторы перемещаются параллельно себе так, чтобы векторы напряжений давали замкнутый треугольник (рис. 7-18).

Если нагрузка фаз равномерная, т. е.

$$z_{AB} = z_{BC} = z_{CA} = z_{\phi}$$

$$\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = \varphi_{\phi},$$

то действующие значения фазных токов равны между собой и токи сдвинуты по фазам на одинаковые углы от соответствующих напряжений (рис. 7-19), на углы 120° один относительно другого. Следовательно, фазные токи образуют симметричную систему.

Опустив перпендикуляр из конца произвольно взя-

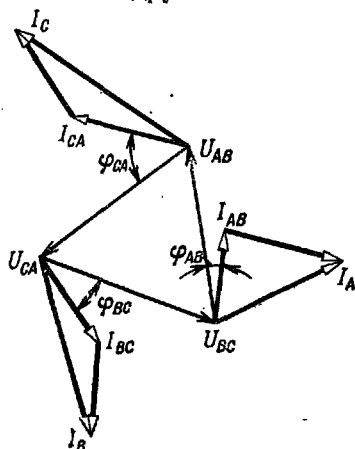


Рис. 7-18. Векторная диаграмма при соединении электроприемников треугольником.

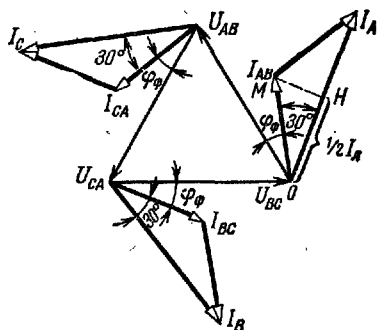


Рис. 7-19. Векторная диаграмма для цепи, соединенной треугольником, при равномерной нагрузке фаз.

того вектора фазного тока I_{AB} на вектор линейного тока I_A , из прямоугольного треугольника OMH , получим, что

$$\frac{1}{2} I_A = I_{\phi} \cos 30^\circ = I_{\phi} \frac{\sqrt{3}}{2},$$

откуда

$$I_A = \sqrt{3} I_{\phi}, \quad (7-21)$$

т. е. линейные токи по абсолютной величине больше фазных токов в $\sqrt{3}$ раз.

Из того же рисунка следует, что линейные токи отстают от соответствующих фазных токов на угол 30° .

Расчет трехфазной симметричной цепи, соединенной треугольником, сводится к расчету одной фазы.

Фазное напряжение

$$U_{\phi} = U_{\lambda};$$

фазный ток

$$I_{\phi} = U_{\phi} / z_{\phi};$$

линейный ток

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\phi}.$$

Угол сдвига фазного тока относительно фазного напряжения определяется через его косинус, синус или тангенс:

$$\cos \varphi_{\phi} = \frac{r_{\phi}}{z_{\phi}}; \quad \sin \varphi_{\phi} = \frac{x_{\phi}}{z_{\phi}}; \quad \operatorname{tg} \varphi_{\phi} = \frac{x_{\phi}}{r_{\phi}}.$$

Активная, реактивная и полная мощности одной фазы определяются выражениями:

$$P_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi}; \quad Q_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi_{\phi}; \quad S_{\phi} = U_{\phi} I_{\phi}.$$

При симметричной системе напряжений и токов соответствующие мощности трех фаз определяются выражениями:

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi_{\phi} = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi_{\phi}; \quad (7-22)$$

$$Q = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi_{\phi}; \quad (7-23)$$

$$S = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}}. \quad (7-24)$$

При несимметричной системе напряжений или неравномерной нагрузке фаз приемников энергии активная и реак-

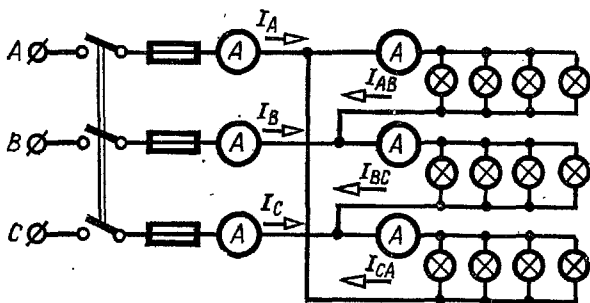


Рис. 7-20. Схема соединения электрических ламп треугольником.

тивная мощности трехфазной системы определяются как суммы мощностей отдельных фаз, т. е. они определяются теми же выражениями, которые были приведены для случая соединения приемников энергии звездой.

Соединение треугольником применяется для включения как ламп (рис. 7-20), так и электродвигателей. При этом

необходимо, чтобы номинальное напряжение ламп было равно линейному напряжению сети. Трехфазный электродвигатель включается треугольником, если номинальное фазное напряжение его равно линейному напряжению сети, или звездой, если номинальное фазное напряжение его в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного напряжения сети.

Пример 7-5. Трехфазный электродвигатель, соединенный треугольником, работает при напряжении 220 В с $\cos \varphi = 0,8$ и мощностью 3 кВт. Определить линейные и фазные токи.

Решение.

Из выражения (7-22) следует, что

$$I_{\Delta} = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\Delta} \cos \varphi} = \frac{3000}{1,73 \cdot 220 \cdot 0,8} = 10 \text{ А.}$$

Фазный ток

$$I_{\Phi} = \frac{I_{\Delta}}{\sqrt{3}} = \frac{10}{1,73} = 6 \text{ А.}$$

Пример 7-6. Трехфазный электродвигатель, соединенный треугольником, работает при напряжении 120 В, имея в цепи питания линейный ток 25 А; мощность двигателя 3 кВт. Определить коэффициент мощности двигателя.

Решение.

Из выражения (7-2) следует, что

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\Delta} I_{\Delta}} = \frac{3000}{1,73 \cdot 120 \cdot 25} = 0,58.$$

Пример 7-7. К трехфазной сети (рис. 7-20) с напряжением $U_{\Delta} = 120$ В присоединены приемники энергии, имеющие сопротивления $r_{AB} = 10$ Ом, $r_{BC} = r_{CA} = 20$ Ом. Определить, под какими напряжениями будут находиться приемники при перегорании предохранителя в проводе В.

Решение.

При перегорании предохранителя приемники АВ и ВС окажутся соединенными последовательно и включенными на линейное напряжение $U_{\Delta} = 120$ В. Ток приемников

$$I_{AB} = I_{BC} = \frac{U_{AC}}{r_{AB} + r_{BC}} = \frac{120}{10 + 20} = 4 \text{ А.}$$

Напряжения на зажимах приемников

$$U'_{AB} = I_{AB} r_{AB} = 4 \cdot 10 = 40 \text{ В;}$$

$$U'_{BC} = I_{BC} r_{BC} = 4 \cdot 20 = 80 \text{ В;}$$

$$U_{CA} = U_{\Delta} = 120 \text{ В.}$$

При любом способе соединения приемников энергии алгебраическая сумма мгновенных значений линейных токов в трехпроводной трехфазной цепи равна нулю.

При соединении звездой без нулевого провода, приняв за положительное направление линейных токов от генератора

к приемнику, по первому закону Кирхгофа, можно написать:

$$i_A + i_B + i_C = 0. \quad (7-25)$$

При соединении приемников энергии треугольником сумма линейных токов равна нулю, так как

$$i_A + i_B + i_C = i_{AB} - i_{CA} + i_{BC} - i_{AB} + i_{CA} - i_{BC} = 0.$$

Естественно, сумма векторов линейных токов равна нулю

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0. \quad (7-26)$$

Поэтому, например, магнитодвижущая сила трех линейных токов в трехфазном кабеле равна нулю, равен нулю и магнитный поток кабеля. Это позволяет для защиты кабеля от механических повреждений применять стальную броню, не опасаясь перегрева ее от перемагничивания, что имело бы место, если бы сумма токов не была равна нулю.

7-6. Лабораторная работа. Трехфазные цепи

а) Четырехпроводная цепь

Перед выполнением работы ознакомиться с содержанием § 7-2 и 7-4.

П л а н р а б о т ы

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы. Записать их основные технические данные.

2. Собрать схему (рис. 7-12) и показать ее преподавателю.

3. При отсоединенном нейтральном проводе (OO') установить равномерную нагрузку фаз, измерить фазные и линейные напряжения, напряжение U_0 между точками OO' и линейные токи.

Вычислить фазные мощности P_A , P_B и P_C .

4. При отсоединенном нейтральном проводе, оставляя числа ламп в фазах A и B неизменными, изменять нагрузку в фазе C . Измерить фазные и линейные напряжения и линейные токи при различных значениях сопротивления фазы C , включая случаи, когда сопротивление фазы C равно нулю (короткое замыкание фазы) и бесконечности (холостой ход фазы). Вычислить фазные мощности.

5. Показания приборов и результаты расчетов записать в табл. 7-1.

Таблица 7-1

№ наблюдений	r_C	I_A	I_B	I_C	I_0	U_A	U_B	U_C	U_0	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	P_A	P_B	P_C	P
	Ом	А	А	А	А	В	В	В	В	В	В	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт

6. Для случаев равномерной и неравномерной нагрузок построить векторные диаграммы.

7. Присоединив нейтральный провод, измерить фазные напряжения, линейные напряжения, линейные токи и ток в нейтральном проводе при различных сопротивлениях фазы С, исключая случай короткого замыкания фазы С. Вычислить фазные мощности. Выявить влияние сопротивления нейтрального провода на режим цепи. Показания приборов и результаты расчетов записать в табл. 7-1. Построить векторные диаграммы.

б) Трехпроводная цепь

Перед выполнением работы ознакомиться с содержанием § 7-5.

П л а н р а б о т ы

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для проведения работы. Записать основные технические характеристики измерительных приборов и оборудования.

2. Собрать схему (рис. 7-20) и показать ее руководителю.

3. При равномерной нагрузке фаз измерить фазные и линейные токи, убедиться, что $I_n = \sqrt{3} I_{\phi}$. Измерить фазные напряжения и вычислить фазные мощности. Построить векторную диаграмму.

4. Показания приборов и результаты расчетов записать в табл. 7-2.

Т а б л и ц а 7-2

№ наблюдений	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}	I_A	I_B	I_C	I_n/I_{ϕ}	P_{AB}	P_{BC}	P_{CA}	P
	В	В	В	А	А	А	А	А	А	—	Вт	Вт	Вт	Вт

5. При одинаковых сопротивлениях двух фаз (r_{AB} , r_{BC}) изменять сопротивление третьей фазы. Для каждого опыта записать показания приборов в табл. 7-2. Вычислить фазные мощности. Построить для одного из опытов в масштабе векторную диаграмму.

6. Установить равномерную нагрузку фаз, вынуть вставку предохранителя в фазе С. Записать показания приборов и построить для этого опыта в масштабе векторную диаграмму. Исследовать влияние изменения сопротивления r_{BC} на режим цепи.

Глава восьмая.

Электротехнические измерения и приборы

8-1. Основные понятия

Измерением называется нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств (мер и измерительных

приборов). Результат измерения выражают именованным числом, состоящим из числа и названия единицы, например, ток равен 15 А.

М е р о й называется средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

И з м е р и т е л ь н ы м п р и б о р о м называется средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Меры и приборы подразделяются на о б р а з ц о в ы е и р а б о ч и е.

Образцовые меры и приборы служат для поверки по ним рабочих средств измерений. При этом значения единиц измеряемых величин с определенной достоверностью передаются рабочим мерам или измерительным приборам. Утверждение мер и приборов в качестве образцовых осуществляется органами государственной метрологической службы.

Рабочие меры служат для практических измерений, не связанных с передачей другим мерам и приборам значений измеряемых величин.

При всяком измерении результат его несколько отличается от действительного значения, под которым понимают значение, найденное при помощи образцовых средств.

Разность между найденным и действительным значениями измеряемой величины называется а б с о л ю т н о й п о г р е ш н о с т ь ю и з м е р е н и я.

Качество измерения оценивается о т н о с и т е л ь н о й п о г р е ш н о с т ь ю измерения, которая представляет собой выраженное в процентах отношение абсолютной погрешности к найденному или действительному значению измеряемой величины.

Пример 8-1. Найденное значение тока $I_1 = 26$ А, а его действительное значение $I = 25$ А. Определить абсолютную и относительную погрешности измерения.

Р е ш е н и е. Абсолютная погрешность измеренного тока

$$\Delta I = I_1 - I = 26 - 25 = 1 \text{ А.}$$

Относительная погрешность измерения тока

$$\gamma_I = \frac{\Delta I}{I} \cdot 100\% = \frac{1}{25} \cdot 100\% = 4,0\%.$$

8-2. Классификация электроизмерительных приборов

Электроизмерительные приборы делятся на две основные группы:

1) приборы непосредственной оценки, дающие численное значение измеряемой величины по их отсчетному устройству, например амперметр, вольтметр; 2) приборы сравнения, предназначенные для сравнения измеряемой величины с мерой, например измерительный мост.

Наибольшее распространение получили приборы непосредственной оценки, как более простые, дешевые и требующие меньшего времени для измерения. Приборы сравнения применяются для более точных измерений.

Приборы по роду измеряемой величины, т. е. например, предназначенные для измерений тока, напряжения, мощности, частоты, угла сдвига фаз, сопротивления, электрической энергии, делятся на амперметры, вольтметры, ваттметры, частотомеры, фазометры, омметры и мегомметры, счетчики энергии и др.

По принципу устройства и действия, т. е. по системам, электроизмерительные приборы делятся на группы, указанные в табл. 8-1. Выбор системы измерительного прибора для измерения определяется ее свойствами, которые должны соответствовать требованиям, предъявляемым к измерениям и условиям, в которых они производятся.

Согласно ГОСТ 1845-59 электроизмерительные приборы делятся на восемь классов точности: 0, 05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5 и 4. На шкалах приборов числа, указывающие класс точности, обводятся кружками.

Число класса точности указывает основную допустимую приведенную погрешность прибора, под которой понимают выраженное в процентах отношение наибольшей допустимой абсолютной погрешности прибора Δx , находящегося в нормальных условиях работы, к номинальной величине прибора x_n .

Таким образом, приведенная погрешность прибора

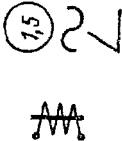
$$\gamma_{\text{пр}} = \frac{\Delta x}{x_n} 100\%. \quad (8-1)$$

Номинальным условиям работы прибора соответствует установка прибора в положение, указанное на его шкале, нормальная температура окружающей среды ($+20^\circ \text{C}$), отсутствие внешнего электромагнитного поля (кроме земного).

Некоторые системы электроизмерительных приборов и условные знаки на их шкалах

Знак системы	Система	Знаки на шкалах приборов	Пояснения
	Магнитоэлектрическая	Классы точности 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5 и 4        	Основные приведенные погрешности 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4%
	Магнитоэлектрический логометр	Род тока   	Постоянный ток Переменный ток Трехфазный ток
	Выпрямительная	Установка прибора   	Вертикальное положение шкалы Горизонтальное положение шкалы Наклонное положение шкалы

Знак системы	Система	Знаки на шкалах приборов	Пояснения
	Термоэлектрическая	 Прочность изоляции прибора	Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением 2 кВ
	Электромагнитная		
	Электродинамическая	 Зажимы	Генераторный зажим Зажим, соединенный с корпусом Зажим для заземления
	Электродинамический логометр		

Знак системы	Система	Знаки на шкалах приборов	Пояснения
	Ферродинамическая	Пример 	Прибор электромагнитной системы, класса точности 1,5, переменного тока, со шкалой, установленной под углом 60° к горизонту
	Индукционная		
	Электростатическая		
	Вибрационная		

Номинальной величиной прибора называется верхний предел измерения его.

Относительная погрешность измерения величины x_1 может быть определена как отношение наибольшей возможной абсолютной погрешности прибора Δx к измеренному значению величины x_1 , т. е.

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x_1} 100\%. \quad (8-2)$$

Заменяя в (8-2) Δx ее выражением из (8-1) $\Delta x = \frac{\gamma_{\text{пр}} x_n}{100\%}$, получим:

$$\gamma_x = \frac{\Delta x}{x_1} 100\% = \frac{\gamma_{\text{пр}} x_n}{100\% x_1} = \gamma_{\text{пр}} \frac{x_n}{x_1}. \quad (8-3)$$

Следовательно, погрешность измерения равна погрешности прибора, умноженной на отношение номинальной величины прибора к найденному значению измеренной величины.

Погрешность при измерении какой-либо величины данным прибором тем меньше, чем ближе измеряемая величина к номинальной величине прибора: следовательно, для лучшего использования точности прибора им следует измерять величины, значения которых соответствуют второй половине шкалы прибора.

Погрешности прибора и измерения могут быть как положительными, так и отрицательными.

Пример 8-2. Определить погрешность при измерении тока амперметром класса точности 1,5, если номинальный ток амперметра 30 А, а показание амперметра 15 А.

Решение. Погрешность (наибольшая возможная) при измерении тока

$$\gamma_I = \gamma_{\text{пр}} \frac{I_n}{I_1} = \pm 1,5\% \frac{30}{15} = \pm 3\%.$$

К электроизмерительным приборам предъявляются многочисленные разнообразные требования; главные из них следующие:

1. Погрешности прибора не должны превышать значений, установленных ГОСТ 1845-59 для того класса точности, к которому он относится.

2. Мощность потерь в приборе должна быть возможно меньшей.

3. Шкала прибора должна быть по возможности равномерной.

4. Прибор должен обладать хорошим успокоением колебаний при перемещении стрелки и хорошей изоляцией.
5. Прибор должен быть выносливым к перегрузкам.

8-3. Измерительные механизмы приборов

Основной частью каждого прибора непосредственной оценки является измерительный механизм (измеритель).

Измерительный механизм — это часть конструкции прибора, состоящая из элементов, взаимодействие которых вызывает их взаимное перемещение. По углу поворота подвижной части измерительного механизма определяется значение измеряемой величины.

а) Магнитоэлектрический измерительный механизм

В воздушном зазоре A (рис. 8-1) между неподвижным стальным цилиндром B и полюсными башмаками $N'S'$ магнит NS создает однородное радиальное магнитное поле. В этом поле расположена прямоугольная катушка — рамка B , укрепленная на двух полуосях — кернах, установленных в опорах. На передней полуоси закреплена указ-

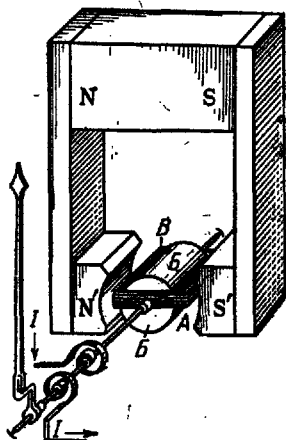


Рис. 8-1. Магнитоэлектрический измерительный механизм.

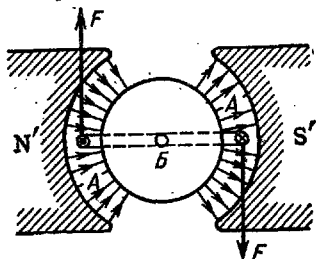


Рис. 8-2. Получение вращающего момента в магнитоэлектрическом измерительном механизме.

тельная стрелка, под свободным концом которой расположена шкала. Обмотка рамки состоит из изолированного провода малого сечения на номинальный ток 10—100 мА.

Ток к рамке подводится через спиральные пружины. Этот ток, проходя по виткам рамки, взаимодействуя с

магнитным полем, создает пару сил FF (рис. 8-2), образующих вращающий момент. Под действием этого момента рамка (подвижная часть) повернется на угол α , при котором он уравнивается противодействующим моментом, созданным пружинами.

Так как вращающий момент пропорционален току $M = kI$, а противодействующий момент пропорционален углу закручивания пружин $M_{\text{пр}} = D\alpha$, то можно написать:

$$M = M_{\text{пр}} = kI = D\alpha, \quad (8-4)$$

где k и D — коэффициенты пропорциональности.

Из написанного следует, что угол поворота подвижной части

$$\alpha = \frac{k}{D} I = S_I I,$$

а ток в катушке

$$I = \frac{D}{k} \alpha = c_I \alpha, \quad (8-5)$$

где $S_I = \alpha/I$ — чувствительность прибора к току, определяемая числом делений шкалы, соответствующим единице тока; $c_I = D/k = I/\alpha$ — постоянная по току, известная для каждого прибора.

Следовательно, измеряемый ток можно определить произведением угла поворота (отсчитывается по шкале) и постоянной по току c_I .

Успокоителем называется устройство для уменьшения времени колебаний подвижной части, возникающих после включения прибора под нагрузку или после изменения значения измеряемой величины.

В магнитоэлектрическом измерителе применяется магнитиндукционное успокоение. Успокоителем служит каркас рамки. При повороте рамки изменяется магнитный поток, пронизывающий каркас. Взаимодействие тока, индуцированного в каркасе, с магнитным полем создает тормозной момент, обеспечивающий успокоение.

При переменном токе вращающий момент изменяется пропорционально мгновенному значению тока. При стандартной частоте момент изменяется настолько быстро, что вследствие инерции подвижная часть поворачивается на угол, пропорциональный среднему за период значению вращающего момента, а следовательно, и среднему значению тока. Среднее значение синусоидального тока равно нулю и подвижная часть не отклоняется. Следовательно, рас-

смотренный измерительный механизм пригоден только для цепей постоянного тока.

Однако если подвижную часть измерителя выполнить в виде узкой петли 2 (рис. 8-3), то вследствие незначительной инерции ее, при прохождении переменного тока по петле, средняя часть ее с укрепленным на ней зеркальцем 3, будет поворачиваться на угол, пропорциональный мгновенному значению тока. По амплитуде отклонений луча, отраженного от зеркала, можно судить о силе тока в петле.

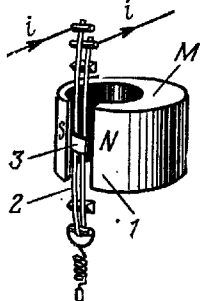


Рис. 8-3. Вибратор магнитоэлектрического осциллографа.

В осциллографах таким измерителем (вибратором) магнитоэлектрической системы пользуются для получения на фотопленке кривой измеряемого тока, а также для визуального наблюдения кривой тока.

б) Электромагнитный измерительный механизм

Электромагнитный измеритель (рис. 8-4) имеет неподвижную катушку А и подвижную часть, состоящую из укрепленных на оси стального сердечника В, указательной стрелки, пружины и алюминиевого сектора В успокоителя.

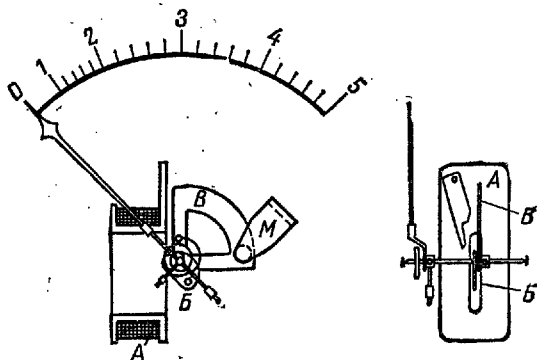


Рис. 8-4. Электромагнитный измерительный механизм.

ника В, указательной стрелки, пружины и алюминиевого сектора В успокоителя.

Измеряемый ток, проходя по катушке, намагничивает сердечник и втягивает его в катушку. По углу поворота подвижной части определяют силу тока.

При повороте подвижной части измерителя в секторе B успокоителя, расположенном в поле магнита M , возникают вихревые токи, взаимодействие которых с полем того же магнита создает тормозной момент, вызывающий успокоение.

Электромагнитный измеритель применяется для измерения постоянного и переменного тока, так как сердечник втягивается в катушку при любом направлении тока.

Из-за остаточной индукции сердечника угол поворота его может быть различным при одинаковых значениях тока при нарастании и при спаде его. Это приводит к погрешности от остаточной индукции. Для уменьшения ее сердечник изготовляют из материала с малой остаточной индукцией (пермаллой).

Уменьшения влияния внешних магнитных полей на показания измерителя достигают: 1) окружая измеритель стальным экраном или кожухом; 2) применением аstaticеского измерителя с двумя сердечниками на одной оси и соответственно с двумя катушками, соединенными последовательно. Поля катушек, созданные измеряемым током, направлены противоположно. Поэтому внешнее однородное поле ослабляет поле одной катушки и усиливает поле другой катушки, в результате влияние внешнего поля будет достаточно слабым.

в) Электродинамический измерительный механизм

Электродинамический измеритель (рис. 8-5) состоит из двух катушек: неподвижной A и подвижной B . Подвижная катушка, стрелка, крыло B воздушного успокоителя и концы двух пружин укреплены на одной оси. В результате электродинамического взаимодействия между токами I_1 и I_2 , проходящими по катушкам, возникает вращающий момент (рис. 8-6). Под действием этого момента подвижная часть повернется на угол α , при котором он уравнивается противодействующим моментом пружин.

В цепи постоянного тока вращающий момент и угол поворота подвижной части пропорциональны произведению токов, т. е.

$$\alpha = k_1 I_1 I_2. \quad (8-6)$$

В цепи переменного тока мгновенный вращающий момент пропорционален произведению мгновенных значений токов, а средний за период вращающий момент и угол поворота

подвижной части зависит не только от действующих значений токов, но и от косинуса угла сдвига между ними, т. е.

$$\alpha = k_1 I_1 I_2 \cos \psi. \quad (8-7)$$

По этому углу поворота (§ 8-4 и 8-5) определяют значение измеряемой величины.

Слабому магнитному полю измерителя соответствует слабый вращающий момент, и для получения высокой точности, которой обладают эти измерители, необходимо уменьшить погрешность от трения

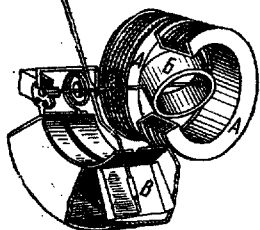


Рис. 8-5. Электродинамический измерительный механизм.

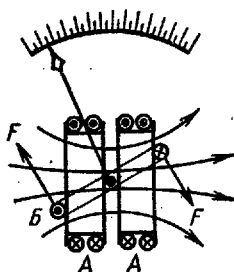


Рис. 8-6. Получение вращающего момента в электрическом измерительном механизме.

в опорах. Это достигается уменьшением массы подвижной части и хорошей обработкой осей и опор.

Уменьшение влияния внешних магнитных полей достигается экранированием или применением астатического измерителя. Электродинамические измерители чувствительны к перегрузкам.

г) Ферродинамический измерительный механизм

Магнитная цепь ферродинамического измерителя (рис. 8-7) состоит из магнитопровода *A* и неподвижного цилиндрического сердечника *Б*, выполненных из листовой стали. Неподвижная катушка *В* с током I_1 , возбуждает магнитный поток, который взаимодействует с током I_2 , в подвижной катушке *Г*, укрепленной на

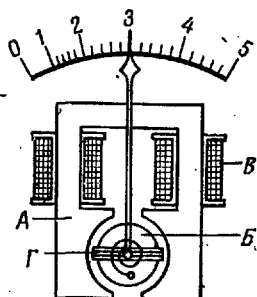


Рис. 8-7. Ферродинамический измерительный механизм.

одной оси со стрелкой. Таким образом, принцип работы измерителя тот же, что и электродинамического. Справедливыми остаются и формулы (8-6) и (8-7).

Присутствие стали усиливает магнитный поток и вращающий момент, что позволяет получить более прочную конструкцию. Внешнее поле практически не влияет на показания измерителя.

8-4. Измерение тока и напряжения

Показания амперметра зависят от тока I_A , идущего через него, поэтому для измерения тока в каком-либо приемнике энергии $I_{пр}$ амперметр включают последовательно с этим приемником, так что $I_A = I_{пр}$ (рис. 8-8).

Включение амперметра не должно влиять на измеряемый ток, поэтому сопротивление его должно быть малым по сравнению с сопротивлением приемника, последовательно с которым он включается. Малому сопротивлению амперметра r_A соответствует и малая номинальная мощность потерь в нем $P_{Ав} = I_{Ав}^2 r_A$.

Для измерения токов, превышающих номинальный ток амперметра (измерителя), в цепях постоянного тока применяют *шунты* (§ 8-4, б), а при переменном токе — *трансформаторы тока* (§ 9-11).

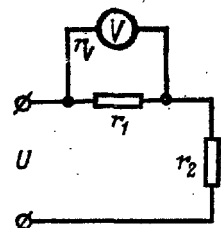


Рис. 8-9. Схема включения вольтметра.

Для измерения напряжения на каком-либо приемнике энергии $U_{пр}$ зажимы вольтметра соединяют с зажимами приемника (рис. 8-9). В этом случае вольтметр покажет напряжение на своих зажимах и на зажимах приемника $U_V = U_{пр}$.

Показания вольтметра зависят от его тока I_V . Для того чтобы они однозначно зависели и от напряжения U_V , сопротивление вольтметра должно быть постоянным, так как в этом случае $U_V = I_V r_V = I_V \text{ const}$.

Сопротивление медной обмотки измерителя вольтметра r_d изменяется на 0,4% при изменении температуры на 10°C . Включая последовательно с измерителем достаточно большое добавочное сопротивление r_d из манганина, величина

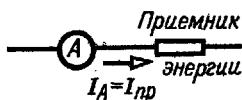


Рис. 8-8. Схема включения амперметра.

которого практически неизменна, обеспечивают постоянство сопротивления вольтметра $r_{\text{и}} + r_{\text{д}} = r_V \approx \text{const}$.

Включение вольтметра не должно влиять на измеряемое напряжение, поэтому сопротивление его должно быть большим относительно приемника энергии, параллельно которому он включен. При большом сопротивлении вольтметра r_V номинальный ток его мал, мала и номинальная мощность потерь, так как

$$I_{VH} \approx U_{VH}/r_V \quad \text{и} \quad P_{VH} = U_{VH} I_{VH} = U_{VH}^2/r_V.$$

Номинальный ток вольтметра равен номинальному току его измерителя, так что

$$I_{VH} = I_{\text{и.н}} = U_{VH}/r_V,$$

а номинальное напряжение вольтметра

$$U_{VH} = I_{VH} (r_{\text{и}} + r_{\text{д}}) = I_{VH} r_V$$

пропорционально его сопротивлению.

Применяя один измеритель с различными добавочными сопротивлениями, получим различные сопротивления вольтметра и соответственно различные номинальные напряжения. Таким образом, *добавочное сопротивление используют для расширения предела измерения напряжения вольтметра.*

Для расширения предела измерения напряжения в цепях переменного тока, кроме добавочного сопротивления, применяют *измерительные трансформаторы напряжения* (§ 9-11).

Амперметры и вольтметры могут иметь измерители одинакового устройства, отличающиеся только своими параметрами, но они имеют разные внутренние измерительные схемы и по-разному включаются в измеряемую цепь.

а) Магнитоэлектрические амперметры и вольтметры

Магнитоэлектрические приборы для измерения малых токов — гальванометры, микроамперметры и миллиамперметры представляют собой измерительный механизм (§ 8-3, а), катушка которого присоединена к зажимам прибора, а на шкале нанесены деления, соответствующие различным значениям измеряемой величины.

Магнитоэлектрический амперметр — это измеритель (§ 8-3, а), который присоединен параллельно шунту (рис. 8-10) для увеличения номинального тока прибора.

Измеряемый ток I делится на ток шунта $I_{ш}$ и ток измерителя $I_{и}$. Напряжение $U_{аб}$ на разветвлении (рис. 8-10)

$$I_{и}r_{и} = I \frac{r_{и}r_{ш}}{r_{и} + r_{ш}},$$

откуда измеряемый ток

$$I = I_{и} \frac{r_{и} + r_{ш}}{r_{ш}} = I_{и} p. \quad (8-8)$$

При неизменных сопротивлениях измерителя и шунта ($r_{и}$, $r_{ш}$) между токами I и $I_{и}$ сохраняется постоянное отношение, что позволяет по углу поворота указательной стрелки измерителя определить ток I .

Сечение шунта должно быть достаточно большим, чтобы не было его нагревания и связанных с этим погрешностей.

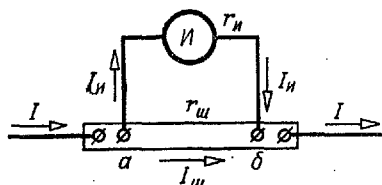


Рис. 8-10. Измерительный механизм с шунтом.

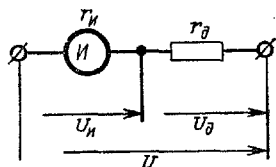


Рис. 8-11. Измерительный механизм с добавочным сопротивлением.

Шунты помещаются или в кожухе прибора (встроенные) или вне его (наружные).

Магнитоэлектрический вольтметр — это измеритель (§ 8-3, а) с последовательно соединенным добавочным сопротивлением (рис. 8-11) для расширения предела измерения напряжения и для обеспечения постоянства сопротивления вольтметра. На шкале его наносятся деления, соответствующие различным значениям напряжения $U_V = I_{и} (r_{и} + r_{д})$. Между напряжением на зажимах вольтметра U_V и напряжением на измерителе $U_{и} = I_{и} r_{и}$ имеет место постоянное отношение

$$p = \frac{U_V}{U_{и}} = \frac{r_{и} + r_{д}}{r_{и}}. \quad (8-9)$$

Технические вольтметры имеют однопредельные добавочные сопротивления, а образцовые и лабораторные — многопредельные, позволяющие использовать отдельные части добавочного сопротивления для получения различных номинальных напряжений.

Магнитоэлектрические приборы изготавливаются классов точности 0,1—2,5.

Из свойств этих приборов отметим: пригодность для работы в цепях постоянного тока, высокую чувствительность, незначительное влияние температуры и внешних магнитных полей, равномерную шкалу, малую мощность потерь и чувствительность к перегрузкам.

б) Выпрямительные амперметры и вольтметры

Выпрямительный амперметр состоит из магнитоэлектрического измерителя (§ 8-3, а) и нескольких полупроводниковых вентилях, соединенных по одной из выпрямительных схем (гл. 17), а выпрямительный вольтметр, кроме того, имеет добавочное сопротивление.

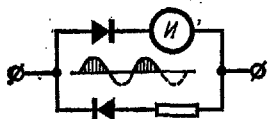


Рис. 8-12. Схема простейшего выпрямительного амперметра.

В простейшем случае выпрямительный амперметр (рис. 8-12) состоит из измерителя, включенного последовательно с вентилям, пропускающим ток в одном направлении, так что через измеритель в течение каждого периода проходит

только одна полуволна переменного тока. Обратная полуволна тока проходит по второй параллельной ветви, в которой вентиль включен в обратном направлении. Средний за период вращающий момент и угол поворота подвижной части амперметра зависят от среднего значения тока, проходящего через измеритель, которое при синусоидальном токе пропорционально действующему значению тока. Эти значения и наносятся на шкале амперметра. Для расширения предела измерения тока применяются шунты.

У вольтметра вследствие постоянства его сопротивления действующие значения тока пропорциональны действующим значениям напряжения на его зажимах, которые непосредственно и отсчитываются на шкале прибора.

Выпрямительные приборы предназначены для работы в цепях переменного тока с частотой до 10 кГц. Класс точности их 1,5—2,5.

в) Термоэлектрические амперметры и вольтметры

Термоэлектрический амперметр состоит из магнитоэлектрического измерителя с контактным (а) или бесконтактным (б) термопреобразователем (рис. 8-13), а вольтметр имеет еще добавочное сопротивление.

Термопреобразователь состоит из проводника — нагревателя H (рис. 8-13) и приваренной к нему или не соединенной с ним термопары T . Последняя образуется двумя проводниками из разных металлов, рабочие концы которых сварены вместе, а свободные концы присоединяются к магнитоэлектрическому измерителю.

Измеряемый переменный ток, проходя по нагревателю, вызывает его нагревание и нагревание рабочих концов термопары. Вследствие этого на ее свободных концах возникает термо-э. д. с., а в подвижной рамке измерителя ток, под действием которого рамка поворачивается на угол, зависящий от измеряемого тока. На шкале амперметра наносятся деления, соответствующие действующим значениям измеряемого тока, а на шкале вольтметра деления, соответствующие действующим значениям напряжения, которые вследствие постоянства сопротивления вольтметра пропорциональны действующим значениям тока.

Термоэлектрические приборы предназначены для работы в цепях переменного тока с частотой до 10—50 МГц. Класс точности их 1,5—2,5.

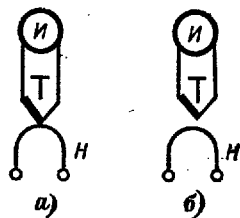


Рис. 8-13. Термоэлектрические амперметры.

a — с контактным преобразователем; b — с бесконтактным преобразователем.

г) Электромагнитные амперметры и вольтметры

Электромагнитный амперметр — это измеритель той же системы (§ 8-3, б), на шкале которого нанесены значения измеряемого тока, проходящего по его катушке. Катушку амперметра можно изготовить из провода любого сечения, на любой номинальный ток (до 300 А и выше), так как она неподвижна и масса ее не влияет на погрешность от трения.

Электромагнитный вольтметр состоит из измерителя (§ 8-3, б) на номинальный ток 20—30 мА, добавочного сопротивления из маганина и шкалы, проградуированной в значениях напряжения.

Активное добавочное сопротивление несоизмеримо больше реактивного сопротивления катушки измерителя, так что сопротивление вольтметра, практически активное, не зависит от температуры и частоты.

Угол поворота подвижной части зависит от тока в катушке и пропорционального ему напряжения на зажимах вольтметра.

Электромагнитные приборы предназначены для цепей переменного тока промышленной частоты. Класс точности их 0,5—2,5.

д) Электродинамические и ферродинамические амперметры и вольтметры

Электродинамический амперметр состоит из измерителя того же названия, катушки которого соединяются последовательно или параллельно в зависимости от номинального тока, а на шкале нанесены значения тока, проходящего по амперметру.

Подвижная катушка измерителя для уменьшения погрешности от трения делается легкой из провода малого

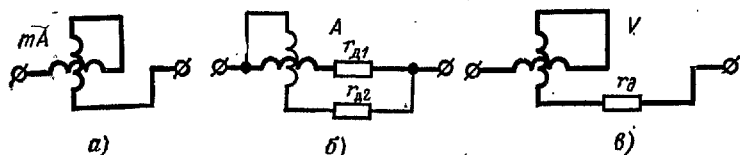


Рис. 8-14. Схемы соединения катушек электродинамических миллиамперметра, амперметра и вольтметра.

сечения. Неподвижная катушка выполняется из провода такого же или большего сечения в зависимости от номинального тока амперметра. В миллиамперметрах катушки соединяются последовательно, в амперметрах — параллельно (рис. 8-14).

При последовательном соединении катушек в них проходит измеряемый ток ($I_1 = I_2 = I$) и угол поворота подвижной части прибора пропорционален квадрату тока (8-7)

$$\alpha = k_1 I_1 I_2 \cos \psi = k_2 I^2. \quad (8-10)$$

При параллельном соединении катушек амперметра угол поворота стрелки так же будет пропорционален квадрату тока (8-10), если активные добавочные сопротивления в ветвях r_{A1} и r_{A2} подобрать так, чтобы токи в ветвях I_1 и I_2 совпадали по фазам ($\psi = 0$) и каждый из них был пропорционален измеряемому току I .

Электродинамический вольтметр состоит из измерителя того же названия, катушки которого

(номинальный ток 20—50 мА) соединены последовательно с добавочным сопротивлением (рис. 8-14). Последнее предназначено для расширения предела измерения напряжения и уменьшения влияния температуры, рода тока и частоты на показания вольтметра.

Электродинамические приборы изготавливаются классов точности 0,1—0,5 для цепей постоянного и переменного тока стандартной и повышенной частоты до 2 кГц. Они чувствительны к перегрузкам и к внешним магнитным полям. Для уменьшения влияния внешних магнитных полей применяются экраны и астатические измерители.

Ферродинамические амперметры и вольтметры применяются главным образом как самопишущие приборы для цепей переменного тока, имея те же внутренние измерительные схемы, что и электродинамические приборы. Ферродинамические приборы обладают большим вращающим моментом, прочной и надежной конструкцией. Они мало чувствительны к внешним магнитным полям. Класс точности их 1,5—2,5.

е) Цифровые приборы

Ц и ф р о в о й п р и б о р представляет собой измерительное устройство, в котором непрерывно изменяющаяся измеряемая величина оценивается дискретной величиной — числом с тремя-четырьмя значащими цифрами, отсчитываемыми на его отсчетном устройстве.

Цифровые приборы можно разделить на 2 группы: *электромеханические*, в которых преобразование измеряемого сигнала производится при помощи электромеханических устройств и *электронные*, в которых используются устройства импульсной техники.

Из приборов первой группы наиболее распространенными являются вольтметры и омметры, из приборов второй группы — вольтметры, частотомеры, фазометры.

В цифровых вольтметрах в большинстве случаев измерение производится сравнением измеряемой величины с образцовой, т. е. нулевым методом.

При включении на входные зажимы измеряемой величины она при помощи весьма сложного устройства автоматически преобразуется в цифровую форму. После этого блок цифрового устройства включает лампы, соответствующие числовым значениям измеряемой величины, которые проектируются на экран для визуального отсчета (рис. 8-15).

Цифровые вольтметры изготавливаются на номинальные напряжения от 100 мкВ до 1 кВ. Время одного измерения не превышает 1 с в вольтметрах первой группы и нескольких миллисекунд у приборов второй группы.

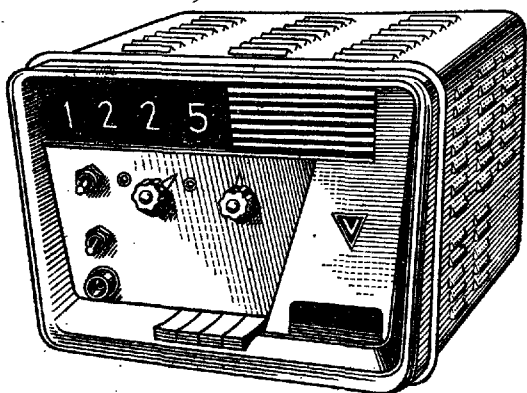


Рис. 8-15. Внешний вид цифрового вольтметра типа Щ1411.

Использование точных цифровых приборов (погрешность 0,01—0,1%) в сочетании с печатными устройствами позволяет автоматизировать процесс измерения и регистрировать его результаты. Эти приборы в сочетании с вычислительными машинами используются для непрерывного контроля автоматизации производственных процессов.

Из недостатков отметим сложность их устройства и высокую стоимость.

8-5. Измерение мощности

Измерив напряжение U и силу тока I в цепи постоянного тока, мощность ее можно определить по формуле

$$P = UI. \quad (8-11)$$

Эту мощность можно также измерить электродинамическим ваттметром.

Электродинамический ваттметр состоит из измерителя той же системы, шкала которого проградуирована в значениях мощности. Неподвижная катушка ваттметра называется токовой или последова-

тельно, так как соединяется последовательно с приемниками энергии (рис. 8-16 и 8-17).

Подвижная катушка ваттметра и безреактивное добавочное сопротивление r_d из манганина представляет собой цепь напряжения или параллельную цепь ваттметра, так как она присоеди-

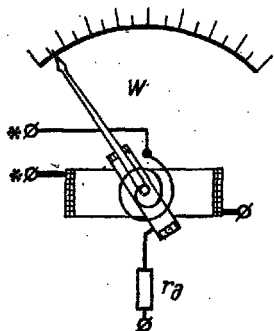


Рис. 8-16. Схема устройства электродинамического ваттметра.

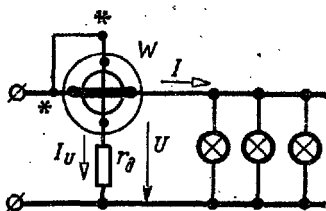


Рис. 8-17. Схема соединения электродинамического ваттметра.

няется параллельно приемнику энергии (рис. 8-17), мощность которого измеряется.

Угол поворота подвижной части электродинамического измерителя пропорционален произведению токов в его катушках (8-6)

$$\alpha = k_1 I I_U,$$

а так как сопротивление параллельной цепи r_U постоянно, то ток в ней пропорционален напряжению ($I_U = U/r_U$) и угол поворота подвижной части ваттметра пропорционален мощности

$$\alpha = k_1 I I_U = k_1 \frac{1}{r_U} I U = k_2 I U = k_2 P. \quad (8-12)$$

Для измерения активной мощности цепи переменного тока ($P = UI \cos \varphi$) применяются электродинамические и ферродинамические ваттметры.

В этом случае угол поворота подвижной части измерителя (8-7)

$$\alpha = k_1 I I_U \cos \varphi.$$

Так как ток в параллельной цепи $I_U = U/r_U$ пропорционален напряжению и совпадает с ним по фазе (рис. 8-18), то угол сдвига φ между токами в катушках прибора равен

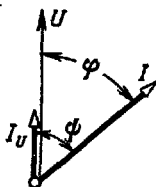


Рис. 8-18. Векторная диаграмма электродинамического ваттметра.

углу сдвига фаз φ между током I и напряжением U и, следовательно, угол поворота подвижной части ваттметра пропорционален активной мощности цепи

$$\alpha = k_1 I I_U \cos \varphi = k_1 \frac{1}{r_U} I U \cos \varphi = k_2 I U \cos \varphi = k_2 P. \quad (8-13)$$

Зажим токовой катушки ваттметра, соединяемый с источником питания, называется генераторным, зажим параллельной цепи, соединяемый с токовой катушкой, также именуется генераторным. Генераторные зажимы отмечаются на приборе звездочками *.

При сборке схем нельзя менять местами зажимы токовой катушки или зажимы цепи напряжения, так как такая

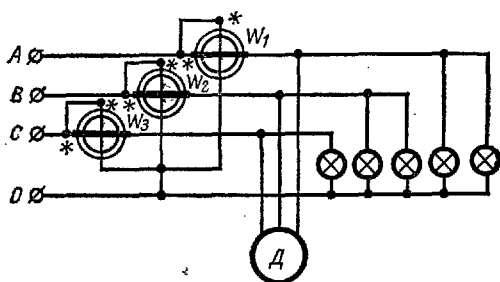


Рис. 8-19. Схема соединения для измерения мощности в четырехпроводной трехфазной цепи.

замена влечет за собой изменение направления тока или изменение фазы соответствующего тока на половину периода, а это вызовет поворот подвижной части ваттметра в обратную сторону.

Включение ваттметра в цепь переменного тока с напряжением свыше 220 В и током выше 5 А производится через измерительные трансформаторы (§ 9-11).

Активная мощность четырехпроводной трехфазной цепи

$$P = P_A + P_B + P_C = I_A U_A \cos \varphi_A + I_B U_B \cos \varphi_B + I_C U_C \cos \varphi_C. \quad (8-14)$$

Измерение ее производится тремя ваттметрами, соединенными по схеме (рис. 8-19), обеспечивающей измерение каждым ваттметром мощности одной фазы. Целесообразней пользоваться *трехэлементным ваттметром*, состоящим из трех неподвижных и трех подвижных катушек, действующих на общую ось с указательной стрелкой. Мощность

трехфазной цепи отсчитывается непосредственно на шкале прибора.

В трехфазной симметричной цепи, измерив ваттметром (рис. 8-20 и 8-21) мощность одной фазы $P_W = P_\phi$ и умножив ее на три, найдем мощность всей цепи $P = 3P_W = = 3P_\phi$.

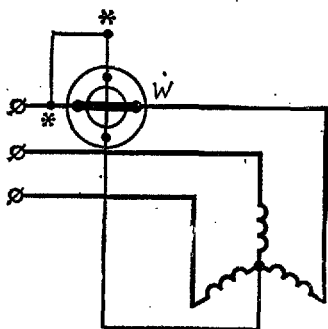


Рис. 8-20. Схема соединения для измерения мощности двигателя при доступной нулевой точке.

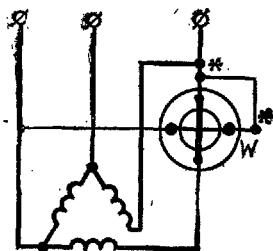


Рис. 8-21. Схема соединения для измерения мощности двигателя при соединении его треугольником.

Мощность трехфазной трехпроводной цепи при симметричной и несимметричной нагрузке измеряется двухэлементным ваттметром.

Двухэлементный ваттметр электродинамической и ферродинамической системы имеет две неподвижные катушки тока и соответственно две подвижные катушки напряжения, укрепленные на одной оси с указательной стрелкой (рис. 8-22).

Мгновенная мощность трехфазной цепи равна сумме мгновенных мощностей трех фаз

$$p = p_A + p_B + p_C = i_A u_A + i_B u_B + i_C u_C. \quad (8-15)$$

Заменив ток i_C его выражением (7-25)

$$i_C = -i_A - i_B, \quad (8-16)$$

получим:

$$\begin{aligned} p &= i_A u_A + i_B u_B - i_A u_C - i_B u_C = \\ &= i_A (u_A - u_C) + i_B (u_B - u_C) = \\ &= i_A u_{AC} + i_B u_{BC} = p_1 - p_2. \end{aligned} \quad (8-17)$$

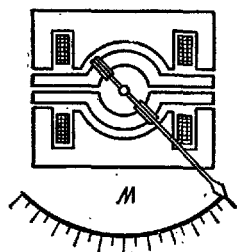


Рис. 8-22. Схема устройства двухэлементного ваттметра.

Из (8-17) следует, что мгновенную мощность трехфазной цепи можно считать состоящей из слагающих p_1 и p_2 .

Включим двухэлементный ваттметр (рис. 8-23) согласно выражению (8-17). Катушку первого элемента включим в рассечку провода A (ток i_A), а катушку тока второго элемента — в рассечку провода B (ток i_B). Цепь напряжения первого элемента присоединим к проводам AC (напряжение u_{AC}), а второго элемента — к проводам BC (напряжение u_{BC}). При такой схеме соединения мгновенный момент, действующий на подвижную часть, пропорционален мгновенной мощности цепи, а угол поворота подвижной части,

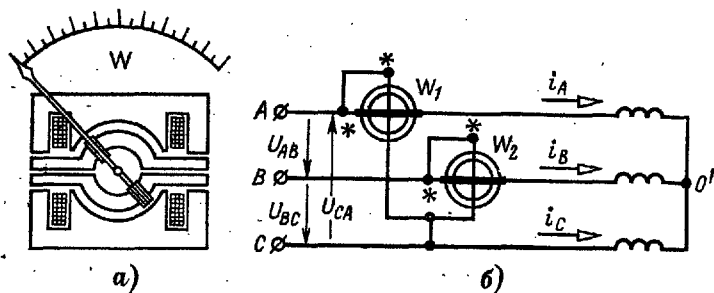


Рис. 8-23. Схема соединения двухэлементного ваттметра для измерения мощности в трехпроводной трехфазной цепи.

пропорциональный среднему вращающему моменту, пропорционален средней или активной мощности трехфазной цепи:

$$P = I_A U_{AC} \cos \varphi_{A-AC} + I_B U_{BC} \cos \varphi_{B-BC}, \quad (8-18)$$

где φ_{A-AC} и φ_{B-BC} — углы сдвига между I_A и U_{AC} и между I_B и U_{BC} .

Рассмотренная схема пригодна при любом соединении приемников, т. е. как при соединении звездой, так и при соединении их треугольником, потому что всякий треугольник может быть заменен эквивалентной звездой.

Две токовые катушки ваттметра могут включаться не только в провода A и B , а в два произвольно выбранных провода трехфазной цепи. Генераторный зажим каждой цепи напряжения ваттметра должен быть присоединен к линейному проводу, в котором включена токовая катушка «своего» элемента. Негенераторные зажимы цепей напряжения соединяются с линейным проводом, свободным от катушки тока ваттметра.

Двухэлементный ваттметр может быть заменен двумя однофазными ваттметрами, соединенными по той же схеме

(рис. 8-23). Активная мощность трехфазной цепи определяется алгебраической суммой их показаний. При отклонении стрелки одного из ваттметров в обратную сторону концы проводов, присоединяемых к зажимам параллельной цепи этого ваттметра, следует поменять местами, считая показание его отрицательным.

8-6. Измерение электрической энергии

Электрическая энергия, расходуемая в однофазных и трехфазных цепях, измеряется индукционными счетчиками. В цепях постоянного тока применяются электродинамические, ферродинамические и другие счетчики.

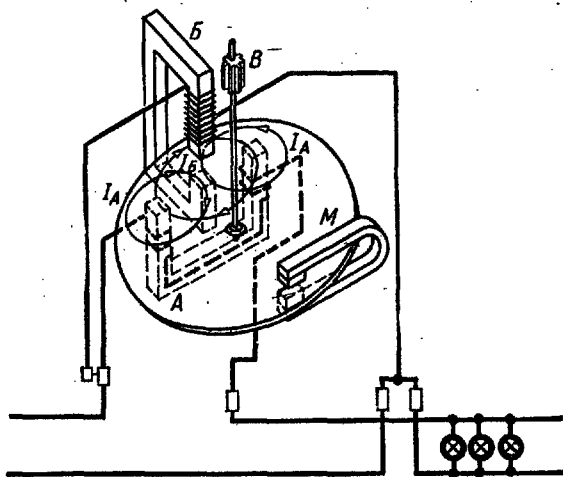


Рис. 8-24. Схема устройства и включения индукционного счетчика.

Электрический счетчик представляет собой *суммирующий прибор*. Основное отличие его от стрелочного прибора состоит в том, что угол поворота его подвижной части, не ограничиваемый пружиной, нарастает, и показания счетчика суммируются. Каждому обороту подвижной части счетчика соответствует определенное количество израсходованной энергии.

Индукционный счетчик (рис. 8-24) состоит из алюминиевого диска, укрепленного на оси, двух электромагнитов (последовательного *A* и параллельного *B*), тормозного

магнита M и счетного механизма, приводимого в движение от шестеренки B .

При прохождении токов по обмоткам электромагнитов создаются два магнитных потока, пронизывающие диск и индуктирующие в нем вихревые токи I_A и I_B . От взаимодействия тока I_A с магнитным потоком Φ_B и тока I_B с потоком Φ_A создается вращающий момент M , пропорциональный мощности потребителя

$$M = k_2 P, \quad (8-19)$$

под действием которого и происходит вращение диска счетчика.

При вращении диска в поле тормозного магнита в диске индуктируются вихревые токи (рис. 8-24). В результате взаимодействия этих токов с полем того же магнита возникает тормозной момент, пропорциональный частоте вращения диска n , т. е.

$$M_T = k_2 n. \quad (8-20)$$

При постоянной частоте вращения диска счетчика равны его вращающий и тормозной моменты:

$$M = M_T \quad \text{или} \quad k_1 P = k_2 n,$$

откуда мощность потребителя

$$P = \frac{k_2}{k_1} n = kn.$$

Таким образом, частота вращения диска счетчика пропорциональна мощности.

Если в сети израсходована энергия $W = Pt$, то за то же время диск счетчика совершит N оборотов:

$$W = Pt = knt = kN; \quad (8-21)$$

следовательно, число оборотов счетчика пропорционально израсходованной энергии.

Количество энергии, израсходованной в сети за время одного оборота диска счетчика

$$W/N = k, \quad (8-22)$$

называется постоянной счетчика.

Энергия, расходуемая в сети, регистрируется счетным механизмом счетчика.

Для определения энергии, израсходованной за некоторый промежуток времени, нужно из показаний счетчика

в конце указанного промежутка вычесть показания его в начале этого промежутка времени.

Счетчики активной энергии делятся на классы точности 1; 2 и 2,5, а реактивной энергии на классы 2 и 3 (ГОСТ 6570-60).

Измерение электрической энергии в трехфазных четырехпроводных цепях производится трехэлементным счетчиком. Он имеет три электромагнитные системы, такие же, как и у однофазного счетчика, которые воздействуют на три диска, укрепленные на одной оси с шестеренкой для приведения в действие счетного механизма. Схема включения счетчика та же, что и трехэлементного ваттметра (рис. 8-20).

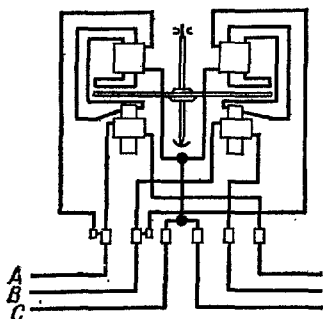


Рис. 8-25. Схема устройства и включения двухэлементного однодискового счетчика.

Измерение энергии в трехфазных трехпроводных цепях производится *двухэлементными* двухдискowymi или однодискowymi счетчиками (рис. 8-25) или *парными счетчиками* (двумя однофазными).

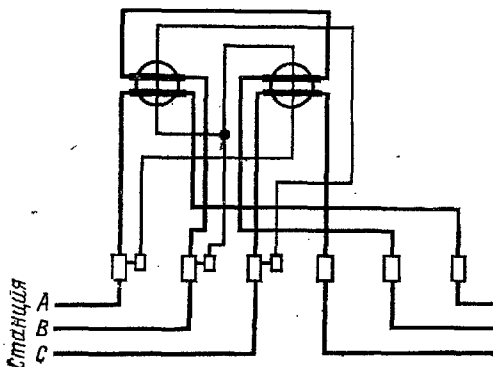


Рис. 8-26. Схема соединения счетчика реактивной энергии типа ИР.

Измерение реактивной энергии в трехфазных цепях производится реактивными счетчиками, например типа СР4-ИТР (рис. 8-26).

Этот счетчик — индукционный двухэлементный с двумя обмотками на каждом последовательном электромагните.

Эти обмотки возбуждают в сердечниках такие магнитные потоки, которые совместно с потоками параллельных электромагнитов создают вращающие моменты, пропорциональные реактивной мощности. Счетный механизм непосредственно регистрирует реактивную энергию.

Расширение пределов измерения тока и напряжения ваттметров и счетчиков производится с помощью измерительных трансформаторов (§ 9-11).

8-7. Измерение сопротивлений

а) Мост для измерений сопротивлений

Мерой электрического сопротивления служит образцовая катушка сопротивления. Набор катушек сопротивлений, соединенных по определенной схеме, заключенный в общий кожух, называется магазином сопротивлений (рис. 8-27).

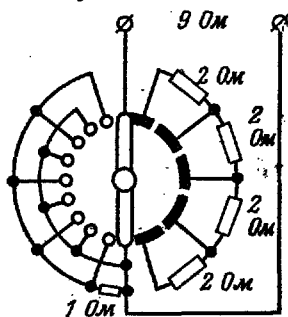


Рис. 8-27. Рычажный пятикатушечный магазин сопротивлений.

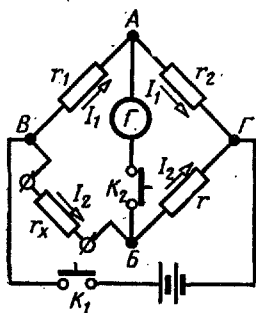


Рис. 8-28. Мост для измерений сопротивлений.

Магазины бывают штепсельные и рычажные, у первых катушки переключаются штепселями, у вторых рычажными переключателями. В пятикатушечном рычажном магазине сопротивлений — в пятикатушечной декаде (рис. 8-27) сопротивление можно изменять от 0 до 9 Ом ступенями по 1 Ом. Аналогичные декады изготавливаются на сопротивления 0,9; 9; 90; 900; 9 000 Ом и выше.

Мост для измерений сопротивлений (рис. 8-28) состоит из трех плеч — трех магазинов сопротивлений r_1 , r_2 и r , которые вместе с четвертым плечом —

измеряемым сопротивлением r_x , образуют замкнутый контур $АГВВ$. К точкам $ВГ$ присоединяется источник питания, а к точкам $АБ$ — гальванометр.

Регулировкой сопротивлений r_1 , r_2 и r получают нулевое отклонение гальванометра. В этом случае (уравновешенного моста) потенциалы точек $А$ и $Б$ одинаковы, следовательно, $U_{ВА} = U_{ВБ}$ и $U_{АГ} = U_{БГ}$, или $I_1 r_1 = I_2 r_x$ и $I_1 r_2 = I_2 r$. Разделив почленно одно равенство на другое, получим:

$$\frac{I_1 r_1}{I_1 r_2} = \frac{I_2 r_x}{I_2 r},$$

откуда

$$r_x = r r_1 / r_2. \quad (8-23)$$

По полученной формуле (8-23) подсчитывается искомое сопротивление.

Если сопротивления трех плеч моста и напряжение питания неизменны, то показания гальванометра зависят только от сопротивления r_x . Это позволяет на шкале гальванометра нанести значения искомого сопротивления или величины, от которой оно зависит, например температуры. Такие мосты называются неуравновешенными.

б) Измерение сопротивлений амперметром и вольтметром

Разделив показания вольтметра на показание амперметра (рис. 8-29), найдем величину сопротивления

$$r'_x = U/I,$$

которая больше действительной величины сопротивления

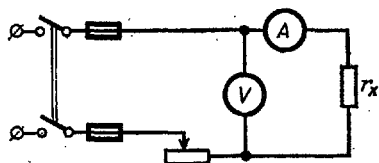


Рис. 8-29. Схема соединения для измерений сопротивлений амперметром и вольтметром (для больших сопротивлений).

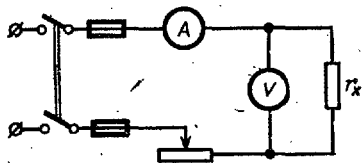


Рис. 8-30. Схема соединения для измерений сопротивлений амперметром и вольтметром (для меньших сопротивлений).

r_x , так как в этом случае вольтметр измеряет сумму напряжений на сопротивлении r_x и на амперметре (r_A). Если сопротивление r_x значительно больше сопротивления r_A , то погрешность измерения не велика.

Частное от деления показания вольтметра на показание амперметра (рис. 8-30) дает величину сопротивления

$$r_x'' = U/I,$$

которая меньше действительной величины сопротивления r_x , так как в этом случае амперметр измеряет сумму токов в сопротивлении r_x и в вольтметре (r_V). Если сопротивление r_x значительно меньше r_V , то погрешность не велика.

в) Омметры

Приборы для непосредственного измерения сопротивлений называются омметрами или мегомметрами.

Они делятся на две группы: омметры, показания которых зависят от напряжения источника питания, и омметры, показания которых не зависят от напряжения источника питания. Как первые, так и вторые могут иметь две измерительные схемы — последовательную и параллельную.

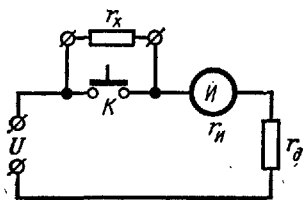


Рис. 8-31. Последовательная схема омметра, показания которого зависят от напряжения источника питания.

Омметр первой группы с последовательной схемой (рис. 8-31) представляет собой магнитоэлектрический измеритель с добавочным сопротивлением r_d , последовательно с которым включается

измеряемое сопротивление r_x . Омметр имеет самостоятельный источник питания — батарею сухих элементов.

При разомкнутой кнопке k ток в измерителе

$$I = C_I \alpha = \frac{U}{r_x + (r_n + r_d)}, \quad (8-24)$$

где C_I — постоянная по току измерителя.

Из (8-24) следует, что угол поворота подвижной части

$$\alpha = \frac{U}{C_I} \frac{1}{r_x + (r_n + r_d)}.$$

Сопротивление $(r_n + r_d)$ постоянно. Если отношение U/C_I также будет постоянным, то угол α будет зависеть только от измеряемого сопротивления r_x и на шкале омметра можно нанести его значения.

Для поддержания неизменным отношения U/C_I при изменении напряжения источника питания необходимо регулировать величину C_I , что достигается изменением магнитной индукции в воздушном зазоре измерителя магнитным шунтом. Магнитный шунт — это стальная пластина, которую поворотом винта приближают или удаляют от полюсных башмаков $N'S'$ измерительного механизма (рис. 8-1).

Для регулировки величины C_I при подключенных батарее и сопротивлении r_x , замкнув кнопку K , изменяют положение магнитного шунта до тех пор, пока стрелка омметра

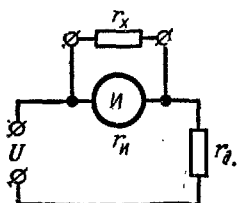


Рис. 8-32. Параллельная схема омметра, показания которого зависят от напряжения источника питания.

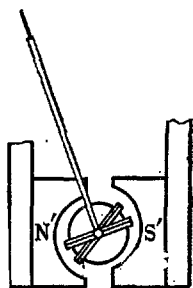


Рис. 8-33. Измерительный механизм логометра.

не установится на нуль шкалы. Разомкнув кнопку, отсчитывают на шкале значение измеряемой величины.

На рис. 8-32 дана другая — параллельная схема того же омметра, в которой измеряемое сопротивление r_x соединяется параллельно измерителю. Можно доказать, что при постоянной величине $r_n + r_d$ и неизменном отношении U/C_I угол поворота подвижной части будет однозначно зависеть от измеряемого сопротивления.

Омметры второй группы имеют магнитоэлектрический измеритель с двумя рамками на одной оси (рис. 8-33). Ток к рамкам подводится при помощи ленточек, не создающих противодействующих моментов.

Токи в рамках направлены противоположно, так что от взаимодействия их с полем магнита создаются два момента, направленные в разные стороны. Разность этих моментов вызывает поворот подвижной части на угол, при котором моменты взаимно уравновешивают друг друга.

Угол поворота подвижной части определяется отношением токов в рамках, т. е.

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right).$$

Измерительные механизмы, угол поворота которых зависит от отношения токов, называются **логометрами**.

Одна параллельная ветвь омметра логометра (рис. 8-34) состоит из рамки и измеряемого сопротивления r_x , другая ветвь — из второй рамки и добавочного сопротивления r_d .

Приняв во внимание, что токи в параллельных ветвях распределяются обратно пропорционально их сопротивлениям, можно написать:

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{r_x}{r_d}\right).$$

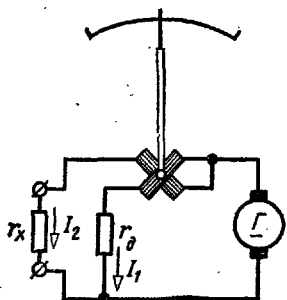


Рис. 8-34. Схема омметра — логометра.

Так как r_d неизменно, то угол поворота зависит от величины измеряемого сопротивления.

Источником питания обычно служит магнитоэлектрическая машина, расположенная в кожухе омметра, приводимая во вращение от руки.

г) Измерение сопротивления изоляции

Изоляция установки относительно легко подвергается изменению, поэтому сопротивление изоляции установки необходимо периодически измерять.

Согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ):

а) испытание сопротивления изоляции осветительных и силовых электропроводок производится мегомметром напряжением 1 000 В;

б) наименьшее сопротивление изоляции допускается 0,5 МОм;

в) сопротивление изоляции при снятых плавких вставках (или при отключенных защитных аппаратах) измеряется на участке между смежными предохранителями или за последним предохранителем (или аппаратом защиты), между любым проводом и землей, а также между двумя проводами.

Для измерения сопротивления изоляции сети, не находящейся под рабочим напряжением, один зажим мегомметра, помеченный буквой Л, присоединяют к испыту-

емому проводу, а второй зажим его, помеченный буквой З, соединяют с землей (рис. 8-35). Вращая рукоятку мегомметра с номинальной скоростью, отсчитывают на шкале значение измеряемого сопротивления.

Присоединив зажим мегомметра Л к второму проводу, аналогично определяют сопротивление изоляции второго

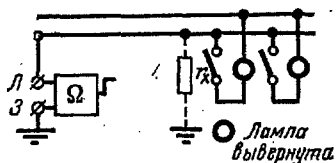


Рис. 8-35. Схема для измерения сопротивления изоляции провода относительно земли.

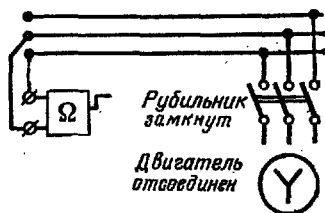


Рис. 8-36. Схема для измерения сопротивления изоляции между проводами.

провода относительно земли. Для измерения сопротивления изоляции между двумя проводами к ним присоединяют два зажима мегомметра Л и З (рис. 8-36). Аналогично производится измерение сопротивления изоляции электрических машин и аппаратов.

8-8. Измерение неэлектрических величин электрическими методами

Измерение неэлектрических величин электрическими методами получило широкое применение и развитие вследствие возможности непрерывного измерения, измерения на расстоянии, высокой точности и чувствительности.

В большинстве случаев измерение неэлектрической величины сводится к преобразованию ее в однозначно зависящую от нее электрическую величину, измеряя которую и определяют неэлектрическую величину.

Элемент измерительного устройства, выполняющий это преобразование, называется измерительным преобразователем или датчиком.

Измерительные преобразователи делятся на две группы: параметрические, преобразующие неэлектрическую величину в один из параметров электрической цепи r , L или C , и генераторные, в которых неэлектрическая величина преобразуется в э. д. с.

К наиболее распространенным параметрическим преобразователям относятся:

1. Реостатные преобразователи. Работа их основана на изменении сопротивления реостата, движок которого перемещается под воздействием измеряемой неэлектрической величины, например уровня жидкости, линейного перемещения детали и т. д.

2. Проволочные преобразователи (тензосопротивления). Работа их основана на изменении сопротивления проволоки при ее деформации.

3. Преобразователи — терморезисторы (термосопротивления). Работа их основана на зависимости сопротивления преобразователя от температуры.

4. Индуктивные преобразователи. Изменение индуктивности преобразователя от изменения положения одной из его частей под действием измеряемой величины используется для измерения силы, давления, линейного перемещения детали.

5. Емкостные преобразователи. Изменение емкости преобразователя под действием измеряемой неэлектрической величины: силы, давления линейного или углового перемещения, содержания влаги и т. д. используется для измерения этих величин.

6. Фотоэлектрические преобразователи. Получение фототока, зависящего от измеряемой величины, или получение импульсов фототока, частота которых зависит от измеряемой неэлектрической величины, используется для измерения освещенности, температуры, прозрачности и мутности жидкости, линейных размеров и других величин.

Генераторные преобразователи по принципу работы делятся на группы:

1. Индукционные преобразователи. Работа их основана на преобразовании измеряемой неэлектрической величины, например скорости, линейных или угловых перемещений, в индуктированную э. д. с.

2. Термоэлектрические преобразователи. Возникновение термо-э. д. с. и ее зависимость от температуры используется для ее измерения.

3. Пьезоэлектрические преобразователи. Пьезоэлектрический эффект, т. е. возникновение э. д. с. в некоторых кристаллах под действием механических сил, используется для измерения этих сил, давления и других величин.

4. Фотоэлектронные преобразователи (см. гл. 18).

Устройства для измерения неэлектрических величин, принципиально состоящие из преобразователя, соединительных проводов и измерителя, проградуированного в значениях измеряемой величины, в действительности усложняются применением сложных схем, источников питания, стабилизаторов, выпрямителей, усилителей и т. д.

Рассмотрим в качестве примеров некоторые из методов измерения неэлектрических величин.

а) Реостатные преобразователи

Реостатный преобразователь представляет собой реостат (рис. 8-37), движок которого перемещается под действием измеряемой неэлектрической величины x , так что сопротивление реостата r зависит от x : $r = f(x)$. Измерив r , находят x .

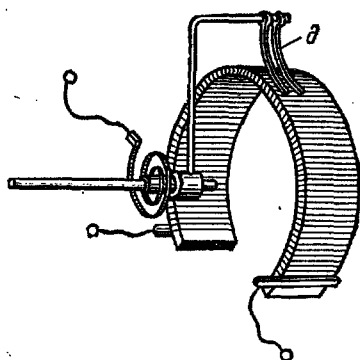


Рис. 8-37. Реостатный преобразователь.

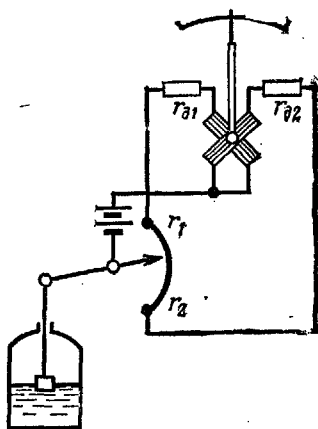


Рис. 8-38. Схема уровнемера.

Пример применения реостатного преобразователя для измерения уровня (объема) жидкости показан на рис. 8-38. Изменение положения поплавка, зависящего от уровня жидкости, изменяет сопротивления r_1 и r_2 , соединенные последовательно с катушками логометра; изменение отношения токов в катушках вызывает изменение показаний измерителя.

б) Индуктивные преобразователи

Индуктивный преобразователь (рис. 8-39, а) представляет собой электромагнит, якорь которого перемещается под действием измеряемой величины P : силы,

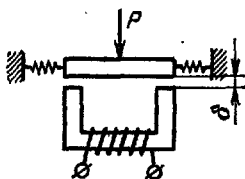


Рис. 8-39а. Схема индуктивного преобразователя.

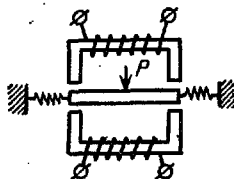


Рис. 8-39б. Схема индуктивного дифференциального преобразователя.

давления, линейного перемещения. При изменении положения якоря изменяются воздушный зазор, индуктивность катушки и ее сопротивление z , так что $z = f(p)$.

У дифференциального преобразователя (рис. 8-39, б) изменение положения якоря увеличивает индуктивность

одной катушки и уменьшает индуктивность другой, что повышает чувствительность преобразователя. Включение катушек в смежные плечи измерительного моста повышает точность измерения.

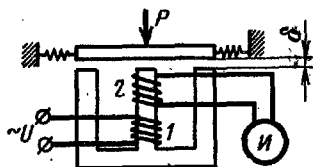


Рис. 8-40. Схема индуктивного преобразователя-трансформатора.

В индуктивном преобразователе трансформаторного типа (рис. 8-40) по первичной обмотке проходит переменный ток с по-

стоянным действующим значением. Измеряемая неэлектрическая величина p , изменяя воздушный зазор, изменяет магнитное сопротивление цепи и магнитный поток. В результате изменяется индуцированная во вторичной обмотке э. д. с. E_2 , и показания вольтметра U_2 зависят от измеряемой величины, т. е. $E_2 \approx U_2 = f(p)$.

в) Индукционные преобразователи

Индукционный тахометр — это прибор для измерения частоты вращения, в котором измеряемая величина преобразуется в пропорциональную ей э. д. в. Тахометр

представляет собой маленький магнитоэлектрический генератор (рис. 8-41), якорь которого вращается в магнитном поле постоянного магнита и, следовательно, э. д. с. которого пропорциональна частоте вращения якоря. Якорь механически связан с валом машины, скорость которой измеряется, поэтому показания вольтметра, соединенного с зажимами якоря, пропорциональны измеряемой частоте вращения.

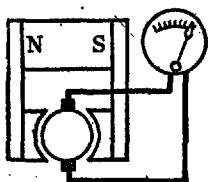


Рис. 8-41. Схема индукционного тахометра.

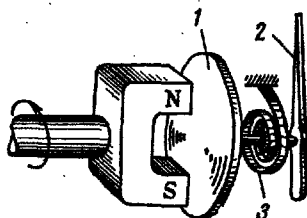


Рис. 8-42. Устройство тахометра с вращающимся магнитным полем.

В индукционном тахометре с постоянным магнитом NS (рис. 8-42) последний механически связан с валом машины, частота вращения которой измеряется. При его вращении в алюминиевом диске 1, расположенном на одной оси со стрелкой 2, индуцируются вихревые токи. Взаимодействие этих токов с полем постоянного магнита создает вращающий момент, вызывающий поворот диска и указательной стрелки на угол, при котором этот момент уравновешивается моментом пружины 3. На шкале тахометра наносятся деления, соответствующие различным частотам вращения.

г) Термоэлектрические преобразователи

Сочетание магнитоэлектрического измерителя с термопарой (рис. 8-43), предназначенное для измерения температур, называется термоэлектрическим пирометром.

Нагревание рабочего конца термопары вызывает термо-э. д. с. и ток в цепи измерителя, по отклонению подвижной части которого и определяется искомая температура. Провода термопары должны быть достаточно длинными, чтобы их свободные

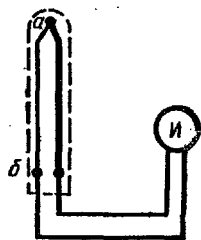


Рис. 8-43. Схема термоэлектрического пирометра.

концы находились в среде с температурой, при которой градуировался пирометр.

Материалами для термопар служат: медь — константан (до 300°C), медь — копель (до 600°C), железо — копель (до 800°C), хромель — копель (до 800°C), хромель — алюминель (до 1300°C), платина — платинородий (до 1600°C).

Для защиты от механических повреждений и действия газов термопары помещают в защитные трубки из латуни, стали, фарфора и других материалов.

8-9. Лабораторная работа. Измерение сопротивлений

в) Измерение сопротивления изоляции мегомметром

Перед выполнением работы ознакомиться с содержанием § 8-7, в и г.

П л а н р а б о т ы

1. Записать основные технические данные измерительных приборов.

2. Пользуясь мегомметром, произвести измерение:

а) сопротивления изоляции каждого из проводов осветительной установки относительно земли (рис. 8-35);

б) сопротивления изоляции между проводами (рис. 8-36).

Перед измерением необходимо замкнуть все выключатели и рубильники, лампы накаливания вывернуть, а другие приемники отсоединить.

3. Выяснить, удовлетворяет ли требованиям правил устройства электроустановок (ПУЭ) изоляция испытуемой установки.

4. Пользуясь мегомметром, измерить:

а) сопротивление изоляции каждой из обмоток статора трехфазного асинхронного двигателя относительно корпуса (земли);

б) сопротивление изоляции между каждым двумя обмотками статора того же двигателя.

5. Выяснить, удовлетворяет ли сопротивление изоляции двигателя правилам эксплуатации.

б) Измерение сопротивлений одинарным мостом

Перед выполнением работы ознакомиться с содержанием § 8-7, а.

П л а н р а б о т ы

1. Записать основные технические данные источника питания, магазинов сопротивлений, приборов.

2. Собрать схему (рис. 8-28) и показать ее руководителю.

3. Измерить сопротивление каждого из двух данных резисторов.

4. Соединить резисторы последовательно и измерить их эквивалентное сопротивление.

5. Соединить резисторы параллельно и измерить их эквивалентное сопротивление.

6. Найденные в п. 4 и 5 значения сопротивлений проверить по формулам (2-36) и (2-43).

№ наблюдений	r_1	r_2	r_1/r_2	r	r_x	U	P_H	Примечание
	Ом	Ом	—	Ом	Ом	В	Вт	

7. Определить сопротивление вольтметров магнитоэлектрической и электромагнитной систем и подсчитать их мощности потерь при номинальном напряжении.

8. Наблюдения и подсчеты записать в табл. 8-2.

9. Дать заключение о выполненной работе.

8-10. Лабораторная работа. Поверка индукционного счетчика

Перед выполнением работы ознакомиться с содержанием § 8-6.

П л а н р а б о т ы

1. Записать основные технические данные измерительных приборов.

2. Собрать схему (рис. 8-44) для проверки счетчика и показать ее руководителю.

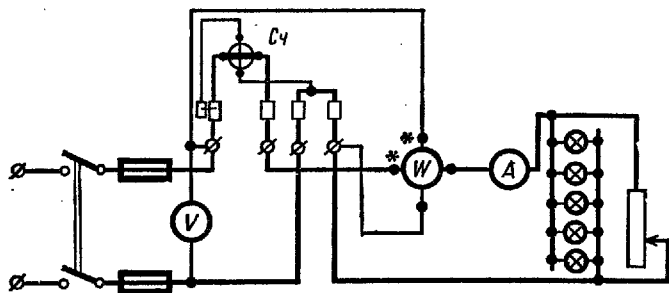


Рис. 8-44. Схема соединения для проверки счетчика.

3. При отсутствии тока в последовательной обмотке счетчика и номинальном напряжении на его параллельной цепи убедиться в отсутствии вращения диска счетчика, т. е. убедиться в отсутствии у счетчика холостого хода.

4. а) При номинальном напряжении в цепи установить нагрузку в 10% номинальной для счетчика и отсчитать целое число оборотов диска счетчика за 100—150 с. Записать показания ваттметра, амперметра, вольтметра и секундомера в табл. 8-3.

б) Определить по формуле

$$k = \frac{Pt}{N}$$

действительную постоянную счетчика, т. е. действительную энергию, расходуемую в цепи за время одного оборота диска счетчика.

Таблица 8-3

№ наблюдений	<i>P</i>	<i>U</i>	<i>I</i>	cos φ	<i>t</i>	<i>N</i>	<i>k</i>	<i>k_н</i>	γ	Примечание
	Вт	В	А	—	с	об	Вт·с/об	Вт·с/об	%	

в) Определить погрешность счетчика при указанной нагрузке, пользуясь формулой

$$\gamma = \frac{k_n - k}{k} 100\%,$$

где *k_н* — номинальная постоянная счетчика, указанная на его шитке.

5. Повторить наблюдение и подсчеты, указанные в п. 4, для нагрузок 25, 50, 75 и 100% номинальной нагрузки счетчика.

6. Определить, удовлетворяет ли счетчик требованиям стандарта в отношении его погрешности, если известно, что по стандарту для счетчика класса точности 2,5 при указанных нагрузках допускается погрешность не выше ±2,5%.

7. Дать заключение о выполненной работе.

8-11. Лабораторная работа. Измерение мощности в трехфазной цепи

Перед выполнением работы ознакомиться с содержанием § 8-5.

П л а н р а б о т ы

1. Записать основные технические данные приборов.
2. Собрать схему (рис. 8-45) и показать ее руководителю.
3. Включить схему в сеть, установить равномерную активную нагрузку и записать в табл. 8-4: токн, напряжения и мощность, измеряемую двухэлементным ваттметром *P* (однополюсные рубильники замкнуты), мощность *P'*, измеряемую первым элементом ваттметра (однополюсный рубильник 2 разомкнут), и мощность *P''*, измеряемую вторым элементом ваттметра (однополюсный рубильник 1 разомкнут).

Убедиться в том, что

$$P = P' + P'' = \sqrt{3} IU.$$

Определить отношение

$$P/P' \text{ и } P/P''.$$

Таблица 8-4

№ наблюдений	I_A	I_B	I_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	P	P'	P''	$P' + P''$	$\sqrt{3}IU$	P/P'	P/P''	$\cos \varphi$	φ	Примечание
	А	А	А	В	В	В	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	—	—	—	град	

4. Повторить измерения и расчеты, указанные в п. 3, при другом значении нагрузки.

5. Установить равномерную смешанную (активно-реактивную) нагрузку и записать в табл. 8-4 величины, указанные в п. 3.

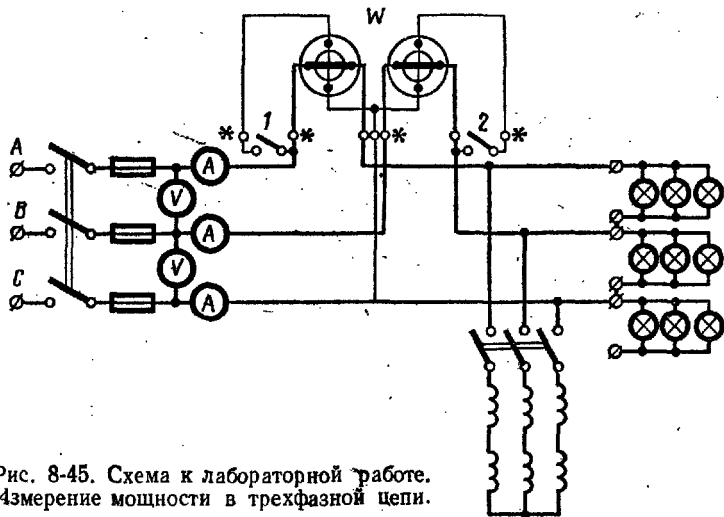


Рис. 8-45. Схема к лабораторной работе. Измерение мощности в трехфазной цепи.

Убедиться в том, что

$$P = P' + P''.$$

Определить $\cos \varphi = P / \sqrt{3} IU$; $\angle \varphi$; P/P' и P/P'' .

6. Изменяя реактивную нагрузку, повторить 3 раза измерения и расчеты, указанные в п. 5.

Сравнивая отношения P/P' при различных нагрузках, а также отношения P/P'' при различных нагрузках, легко убедиться, что отношения не остаются постоянными. Это дает право утверждать, что по показанию одного из элементов ваттметра нельзя судить о мощности цепи трехфазного тока.

7. Произвести два измерения мощности при неравномерной смешанной нагрузке трехфазной цепи. Показания приборов записать в табл. 8-4.

8. Дать заключение о выполненной работе.

Глава девятая

Трансформаторы

9-1. Назначение трансформаторов

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования одной — первичной системы переменного тока в другую — вторичную, имеющую, в частности, другое напряжение и другой ток, при неизменной частоте. Таким образом, к трансформатору подается энергия при одних напряжении U_1 и токе I_1 , а получается послетрансформации энергия при других напряжении U_2 и токе I_2 .



П. Н. Яблочков (1847—1894).

В современных энергетических системах электрическую энергию, вырабатываемую на тепловых электростанциях, расположенных в районе больших запасов угля, нефти или газа, или на гидроэлектростанциях, использующих

напор больших рек, передают на большие расстояния, до 1 000 км и более.

Для экономичной передачи энергии напряжение в линиях электропередачи необходимо повышать до десятков и сотен киловольт, а в местах ее использования обратно понижать до необходимого уровня. Если принять во внимание, что электрическая энергия, получаемая на электростанциях, по пути к месту использования подвергается трех- и даже четырехкратной трансформации, то необходимо, чтобы к. п. д. трансформатора был очень высок.

Изобретателем трансформатора был выдающийся конструктор и ученый П. Н. Яблочков.

9-2. Принцип действия и устройство однофазного трансформатора

Работа трансформатора основана на явлении взаимной индукции (см. § 3-18).

Упрощенная схема устройства однофазного трансформатора показана на рис. 9-1. На магнитопроводе 1, собранном из лакированных с двух сторон листов трансформаторной стали, содержащей 4—5% кремния, помещены обмотки трансформатора 2 и 3. От питающей сети энергия подается к обмотке 2, которая называется первичной. Мощность P_1 является первичной мощностью трансформатора или мощностью на входе. Обмотка 3 присоединена к потребителю энергии z и называется вторичной, а мощность P_2 — вторичной мощностью или мощностью на выходе.

Обычно напряжения обмоток не равны. Обмотка, рассчитанная на большее напряжение, называется обмоткой высшего напряжения (ВН), а вторая — обмоткой низшего напряжения (НН). Каждая обмотка состоит из двух половин, помещенных на разных стержнях магнитопровода и соединенных между собой так, чтобы их магнитодвижущие силы (м. д. с.) складывались, создавая общий магнитный поток. Большая часть этого потока Φ замыкается вдоль магнитопровода 4 и называется полезным потоком. Он сцеплен с обеими обмотками. Часть магнитного потока, замыкающегося по воздуху и сцепленного только с одной обмоткой (5 или 6), называется потоком рассеяния.

На рис. 9-1 первичная и вторичная обмотки показаны раздельно, для упрощения чертежа, обычно же они расположены концентрично: обмотка низшего напряжения ближе к магнитопроводу, а высшего — дальше от него.

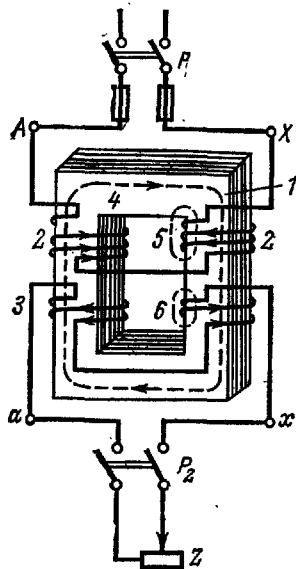


Рис. 9-1. Однофазный трансформатор.

Трансформатор называется понижающим, если первичное напряжение больше вторичного ($U_1 > U_2$), в обратном случае он называется повышающим ($U_1 < U_2$). У трехфазных трансформаторов выводы обмоток обозначаются: начала и концы соответственно A, B, C и

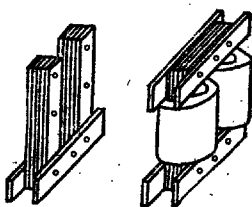


Рис. 9-2. Сборка сердечника трансформатора.

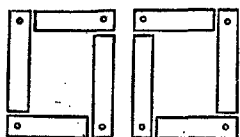


Рис. 9-3. Расположение листов стали при сборке.

X, Y, Z — высшего напряжения и a, b, c и x, y, z — низшего напряжения. У однофазных трансформаторов начало и конец на стороне высшего напряжения A и X , а на стороне низшего напряжения a и x . Сборка магнитопровода показана на рис. 9-2, а расположение отдельных листов в слоях — на рис. 9-3. Толщина листов равна 0,5—0,35 мм. Форма сечения сердечников трансформатора показана на



Рис. 9-4. Сечения сердечников трансформаторов.

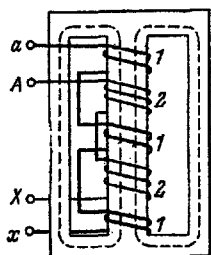


Рис. 9-5. Броневой трансформатор.

рис. 9-4. Существуют трансформаторы, имеющие сердечник с разветвленной магнитной цепью (рис. 9-5).

Номинальные величины трансформатора — мощность, напряжения, токи, частота указываются на заводском щитке. Ввиду того что к. п. д. трансформатора высок, номинальные мощности обеих обмоток считают условно равными ($P_{1н} = P_{2н}$).

9-3. Холостой ход однофазного трансформатора

Если при разомкнутом рубильнике P_2 (рис. 9-1 и 9-6) подать на первичную обмотку 2 номинальное напряжение U_1 , то будет режим, называемый холостым ходом трансформатора.

Под влиянием первичного напряжения U_1 , в обмотке АХ проходит переменный ток холостого хода I_x , не превышающий 4—10% номинального тока. Этот ток можно считать состоящим из реактивной составляющей $I_{p.x}$, поддерживающей магнитный поток Φ_m , и активной $I_{a.x}$, пропорциональной потерям в трансформаторе при холостом ходе:

$$I_x = \sqrt{I_{a.x}^2 + I_{p.x}^2}.$$

Так как ток холостого хода по сравнению с номинальным очень мал, то потерями мощности в первичной обмотке на ее нагревание $I_x^2 r_1$ пренебрегают, считая мощность $P_x = P_{ст} + I_x^2 r_1 \approx P_{ст}$ мощностью потерь в стали $P_{ст}$.

Магнитный поток трансформатора создается м. д. с. $I_{p.x} w_1$, но так как $I_{a.x} < 0,1 I_x$, то за м. д. с. трансформатора можно принять $I_x w_1 = F_x$.

На векторной диаграмме для режима холостого хода (рис. 9-7) в произвольном направлении отложен ток холостого хода I_x , а в фазе с ним максимальное значение пульсирующего потока Φ_m . Этим потоком в первичной и вторичной обмотках наводятся э. д. с. (см. § 6-11)

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m, \quad (9-1)$$

которая является противо-э. д. с., действующей в первичной обмотке, и

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m, \quad (9-2)$$

которая устанавливает напряжение на зажимах вторичной обмотки. Эти э. д. с. отстают от потока на угол 90° . Поток

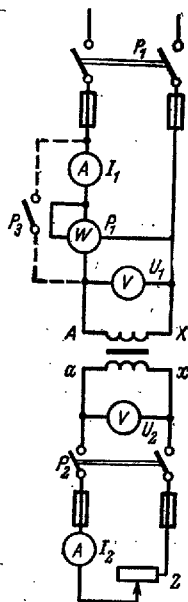


Рис. 9-6. Схема включения трансформатора.

рассеяния первичной обмотки Φ_{1p} , находящийся в фазе с током I_x , наводит в ней э. д. с. рассеяния, отстающую от тока на угол 90° :

$$E_{1p} = 4,44f\omega_1 \Phi_{1p}. \quad (9-3)$$

Как было показано ранее (§ 3-13),

$$E_{1p} = I_1 \omega L = I_{1x} x_1, \quad (9-4)$$

где x_1 — индуктивное сопротивление первичной обмотки, обусловленное потоком рассеяния этой обмотки.

Падение напряжения $I_x x_1$ в первичной обмотке при холостом ходе меньше $0,5\% U_1$, и им можно пренебречь. Тогда по второму закону Кирхгофа мгновенные значения напряжения и э. д. с., равные между собой, сдвинуты по фазе на 180° , т. е.

$$u_1 = -e_1.$$

Так как

$$u_1 = U_{1m} \sin \omega t,$$

то

$$e_1 = -U_{1m} \sin \omega t = U_{1m} (\sin \omega t + 180^\circ).$$

Рис. 9-7. Векторная диаграмма для холостого хода трансформатора.

Значит, действующие значения напряжения и э. д. с.

$$U_1 = E_1 = 4,44f\omega_1 \Phi_m$$

равны и находятся в противофазе (рис. 9-7), если величиной E_{1p} пренебречь.

Ток I_2 и падение напряжения во вторичной обмотке равны нулю, поэтому мгновенные значения u_2 и e_2 равны и, следовательно,

$$U_2 = E_2 = 4,44f\omega_2 \Phi_m.$$

Отношение чисел витков обмоток или э. д. с. называют коэффициентом трансформации трансформатора:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44\omega_1 \Phi_m}{4,44\omega_2 \Phi_m} = \frac{\omega_1}{\omega_2}. \quad (9-5)$$

Этот коэффициент обычно определяют отношением напряжений при холостом ходе, пренебрегая падением напряжения в обмотках:

$$k = \frac{U_1}{U_2}. \quad (9-6)$$

9-4. Работа нагруженного трансформатора и диаграмма магнитодвижущих сил (м. д. с.)

Если при замкнутом рубильнике P_1 включить рубильник P_2 (рис. 9-1 и 9-6), то ко вторичной обмотке трансформатора подключается приемник энергии z . Под влиянием э. д. с. E_2 во вторичной цепи устанавливается ток I_2 , величина и направление которого по закону Ленца такие, что он поддерживает неизменным поток трансформатора Φ_m . Другими словами, при нагрузке поток Φ_m создается совместным действием м. д. с. обеих обмоток

$$\bar{F}_1 + \bar{F}_2 = \bar{F}_x, \quad (9-7)$$

причем так, что F_x остается практически неизменной и равной м. д. с. холостого хода. Причиной этого в следующем. Электродвижущая сила $E_1 \equiv \Phi_m$, а так как падение напряжения $I_1 z_1 < (2 \div 2,5\%) U_{1н}$, то им можно пренебречь и считать, что $E_1 \approx U_1$ и $\Phi_{1м} \equiv U_{1н}$. Отсюда приближенно можно считать, что магнитный поток Φ_m при неизменном первичном напряжении величина практически постоянная и остается почти постоянной при всех режимах м. д. с. $F_{1х}$. Диаграмма м. д. с. нагруженного трансформатора показана на рис. 9-8.

Магнитный поток Φ_m находится в фазе с м. д. с. F_x . В фазе с током I_2 , отстающим от э. д. с. E_2 на угол ψ_2 , показана м. д. с. F_2 . Чтобы м. д. с. F_x сохраняла свою величину, первичной обмоткой должна создаваться м. д. с.

$$\bar{F}_1 = \bar{F}_x + (-\bar{F}_2).$$

В этом случае, если ток I_1 первичной обмотки в данное мгновение направлен от начала обмотки к концу, ток I_2 вторичной обмотки направлен от конца к началу ее и с ростом тока I_2 должен автоматически увеличиваться ток I_1 . Коэффициент мощности $\cos \varphi_1$, очень малый при холостом ходе ($\cos \varphi_x < 0,1$), увеличивается с ростом нагрузки за счет активной слагающей тока I_2 (угол φ_1 меньше угла ψ_x).

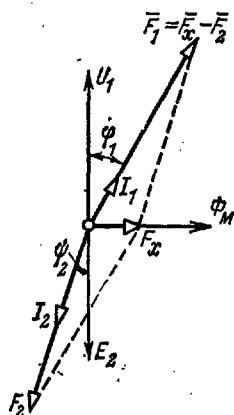


Рис. 9-8. Векторная диаграмма для м. д. с. трансформатора.

Если пренебречь величиной F_x и считать, что $F_1 = F_2$, т. е. $I_1 \omega_1 = I_2 \omega_2$, то

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{1}{k} = \frac{E_2}{E_1}. \quad (9-8)$$

Таким образом, токи трансформатора обратно пропорциональны э. д. с.

9-5. Изменение напряжения трансформатора при нагрузке

В трансформаторе, так же как и в электрическом генераторе, необходимо знать изменение напряжения на его зажимах при переходе от холостого хода к номинальной нагрузке, т. е. $\Delta U\%$.

Оно определяется по формуле

$$\Delta U\% = \frac{U_{2x} - U_{2н}}{U_{2x}} 100\% \quad (9-9)$$

и носит название процентного изменения напряжения трансформатора. Эта величина очень мала и при $I_2 = I_{2н}$ и $\cos \varphi_2 = 1$ составляет $(2-3\%) U_{2н}$.

Рассматривая формулу (9-9), можно подумать, что изменение напряжения подсчитывается только для вторичной обмотки. Однако это не так, так как в нагруженном трансформаторе нельзя пренебрегать потерей напряжения в первичной обмотке и связанным с этим изменением противо-э. д. с. E_1 , магнитного потока трансформатора, а значит, и э. д. с. E_2 .

Рис. 9-9. Векторная диаграмма нагруженного трансформатора.

На диаграмме напряжений нагруженного трансформатора при номинальных токах в обмотках (рис. 9-9) величина э. д. с. первичной обмотки E_1 меньше, чем при холостом ходе, на величину падения напряжения $I_1 z_1$, так как

$$\bar{U}_{1н} = -\bar{E}_1 + (\bar{I}_1 r_1 + \bar{I}_1 x_1).$$

При уменьшении E_1 уменьшается поток Φ_m , и э. д. с. вторичной обмотки становится меньше, чем при холостом ходе, т. е. $E_2 < E_{2x}$.

Напряжение U_2 вторичной обмотки нагруженного трансформатора получается вычитанием падения напряжения во вторичной обмотке не из э. д. с. холостого хода E_{2x} , а из э. д. с. нагруженного трансформатора E_2 , т. е.

$$\bar{U}_1 = \bar{E}_2 - (\bar{I}_2 r_2 + \bar{I}_2 x_2).$$

Таким образом, формула (9-9) учитывает потери напряжения в обеих обмотках.

9-6. Мощность потерь в обмотках нагруженного трансформатора

Мощность потерь в обмотках трансформатора зависит от токов I_1 и I_2 , активных сопротивлений обмоток r_1 и r_2 и равна $P_0 = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2$.

Определение этой мощности производится опытом короткого замыкания трансформатора, который проводится по схеме рис. 9-6, если вторичную обмотку замкнуть накоротко, а к первичной подвести такое пониженное напряжение U_k , при котором в обмотках устанавливаются номинальные токи $I_{1н}$ и $I_{2н}$. Напряжение U_k называется напряжением короткого замыкания, оно не превышает (5—10%) $U_{1н}$ и всегда обозначено на паспорте трансформатора. При этом опыте безразлично, какую обмотку сделать первичной.

Мощность в цепи питания, измеренная при этом опыте, расходуется на покрытие потерь в обмотках $P_{о.н}$ и потерь в стали при коротком замыкании $P_{ст.к}$, которые вследствие малого значения индукции B_k так малы, что ими пренебрегают. Тогда вся мощность при коротком замыкании равна

$$P_{к.н} = P_{о.н} + P_{ст.н} \approx P_{о.н}. \quad (9-10)$$

Таким образом, полные потери нагруженного трансформатора при номинальных токах и при номинальном напряжении

$$\Sigma P = P_{о.н} + P_{ст.н}. \quad (9-11)$$

9-7. Трехфазный трансформатор

На подстанциях, служащих для распределения электрической энергии, большую часть применяются трехфазные трансформаторы (рис. 9-10).

Магнитопровод трансформатора набирается из стальных листов (§ 9-2), как показано на рис. 9-11. На каждом из трех сердечников concentрично располагаются первичная и вторичная обмотки одной фазы AX и ax ; BY и by ; CZ и cz . На рис. 9-10 они для упрощения изображены смещенными вдоль сердечников.

Первичная и вторичная обмотки соединяются в звезду Y или треугольник Δ . По ГОСТ 11677-65 трансформаторы

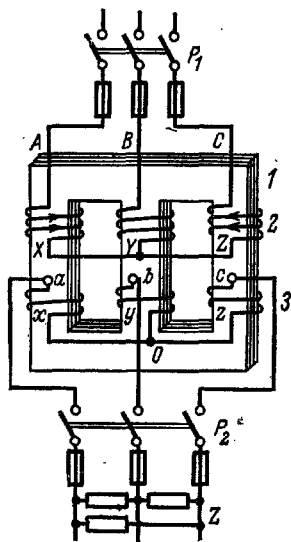


Рис. 9-10. Трехфазный трансформатор.

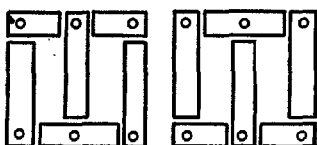


Рис. 9-11. Расположение листов при сборке.

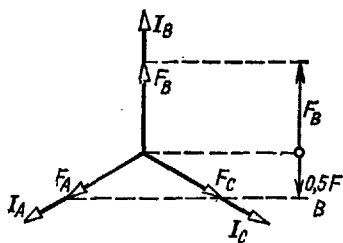


Рис. 9-12. Диаграмма м. д. с. трехфазного трансформатора.

соединяются в схемы звезда—звезда с выведенной нулевой точкой (Y/Y_0), звезда—треугольник (Y/Δ) и звезда с нулевой точкой — треугольник (Y_0/Δ). В числителе обозначено соединение обмотки BH , в знаменателе HH .

Если рассматривать отдельно потоки, создаваемые м. д. с. $F_A = I_A \omega A$; $F_B = I_B \omega B$; $F_C = I_C \omega C$, то можно заметить, что магнитный поток фазы AX (рис. 9-10) замыкается через стержни B и C , фазы BY — через стержни A и C , фазы CZ — через стержни A и B . При одновременном существовании токов во всех трех фазах эти м. д. с. суммируются, как показано на рис. 9-12, где $I_B = I_{Bm}$.

На щитке трансформатора, кроме обозначения схемы соединения обмоток, цифрами дается обозначение группы

соединения, например, Y/Y_0-0 , $Y/\Delta-11$. Группа указывает угловой сдвиг линейной э. д. с. обмотки низшего напряжения относительно линейной э. д. с. обмотки высшего напряжения по движению часовой стрелки. За единицу измерения принят угол 30° . При группе 0 сдвиг равен 0° , а при группе 11— 330° . Для потребителя энергии этот сдвиг не имеет значения, он дается для определения возможности включения трансформаторов на параллельную работу.

Во многих случаях сеть напряжением U_1 должна одновременно питать две другие сети с различными напряжениями U_2 и U_3 . Для этого необходимо иметь два трансформатора с коэффициентами трансформации $k_1 = U_1/U_2$ и $k_2 = U_1/U_3$. Однако для той же цели применяют трансформатор, имеющий одну первичную обмотку высшего напряжения (ВН) и две вторичные: среднего напряжения (СН) и низшего напряжения (НН). Такой трансформатор называется *трехобмоточным*, например: трехфазный трансформатор номинальной мощностью $P_n = 6\,300\text{ кВ}\cdot\text{А}$ и напряжениями (ВН) — 121 кВ, (СН) — 38,5 кВ и (НН) — 11 кВ.

Обмотки трансформаторов соединяются по схеме $Y_0/Y_0/\Delta-0-11$ или $Y_0/\Delta/\Delta-11-11$. За номинальную мощность принимается мощность первичной обмотки, так как расчетом всегда обусловлено, что $P_{вн} = 100\%$, а для вторичных обмоток $P_{сн}$ и $P_{нн} — 100\%$ или 66,7% в любом варианте. Трехобмоточный трансформатор экономичнее, чем два отдельных двухобмоточных трансформатора.

Многообмоточные трансформаторы имеют одну первичную обмотку и несколько вторичных в зависимости от числа питаемых цепей и применяются, например, в радиоприемниках, телевизорах, магнитофонах и др. Все обмотки рассчитываются на соответствующие напряжения.

9-8. Регулирование напряжения трансформаторов

Регулирование напряжения генератора производится очень просто — изменением тока возбуждения, а значит, магнитного потока и э. д. с. В трансформаторе при неизменном первичном напряжении $U_{1н}$ магнитный поток Φ_m и э. д. с. практически постоянны и регулирование вторичного напряжения возможно только изменением коэффициента трансформации.

На рис. 9-13 показан трехфазный трансформатор, у которого от каждой фазы первичной обмотки ВН сделаны дополнительные выводы к контактам переключателя, смонтированного в баке трансформатора.

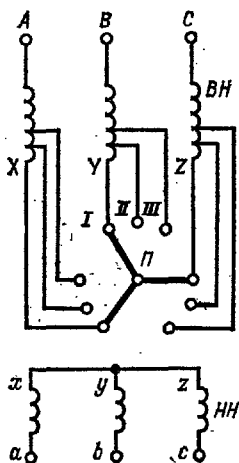


Рис. 9-13. Расположение ответвлений на обмотке трансформатора.

Рукоятка переключателя находится снаружи на крышке бака. Ответвления сделаны из расчета изменения коэффициента трансформации на $\pm 5\%$. В случае понижения в первичной цепи напряжения ниже номинального переключателем уменьшают число витков (положение переключателя III) с тем, чтобы вторичное напряжение сохранилось на уровне номинального. При повышении напряжения в питающей сети выше номинального переключатель устанавливают в положение I. Такое переключение осуществляют при отключенном трансформаторе, что вызывает перерыв в подаче энергии потребителю. Для регулирования напряжения под нагрузкой применяются специальные переключающие устройства.

9-9. Автотрансформаторы

Автотрансформатором называется трансформатор, у которого часть обмотки принадлежит одновременно двум цепям, первичной и вторичной (рис. 9-14). Применение автотрансформатора выгодно в том случае, когда коэффициент трансформации $k < 1,25 + 2$. Автотрансформаторы применяются для связи высоковольтных сетей 500 и 220 кВ, пуска асинхронных и синхронных электродвигателей, как делители напряжения в лабораториях и др. Автотрансформатор работает следующим образом. При питании первичной обмотки AX от сети переменного тока (рис. 9-14, а) в сердечнике возбуждается магнитный поток, наводящий в ней противо-э. д. с. E_1 . На участке ax, являющемся вторичной цепью, устанавливается напряжение, пропорциональное числу его витков. Ток вторичной цепи I_2 проходит на участке ax, а ток первичной цепи I_1 по всей обмотке AX. Таким образом, при встречных направлениях первичного и вторичного токов на части

обмотки ax проходит разность токов $I_{ax} = I_1 - I_2$, что позволяет брать меньшее сечение провода этой обмотки. Автотрансформатор, показанный на рис. 9-14, а, понижающий, так как $w_1 > w_2$. Если подать напряжение U_1 на зажимы ax , он будет повышающим ($w_1 < w_2$). На рис. 9-14, б показан трехфазный понижающий автотрансформатор.

Существуют автотрансформаторы с изменяющимся коэффициентом трансформации (рис. 9-14, в), которые позволяют плавно регулировать напряжение от нуля до 1,1

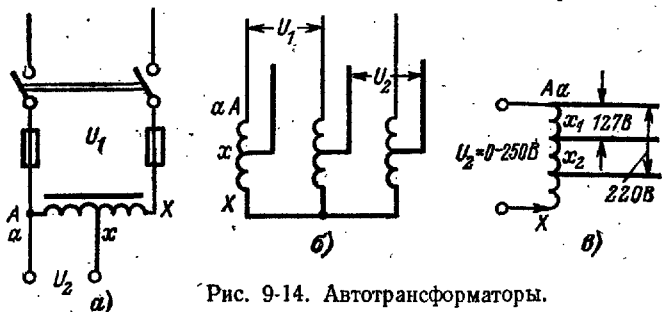


Рис. 9-14. Автотрансформаторы.

$U_{1н}$. Дополнительные выводы у первичной обмотки позволяют подключать трансформатор к сети напряжением 127 и 220 В. В них контактный ролик-зажим X катится по оголенной от изоляции внешней первичной обмотке, что позволяет плавно регулировать вторичное напряжение с интервалами менее 1 В.

Основной недостаток всех автотрансформаторов в том, что обмотки ВН и НН электрически связаны. При высоком напряжении коэффициент трансформации берут меньше 2—2,5, так как изоляция вторичной цепи относительно земли должна быть такая же, как первичной.

Достоинством автотрансформатора является меньший расход металла (медь) на устройство обмоток, меньшие в них потери на нагревание и, следовательно, более высокий к. п. д. по сравнению с обычным трансформатором.

9-10. Трансформаторы для дуговой электросварки

Обычные трансформаторы в качестве питания дуговой электрической сварки совершенно не пригодны потому, что перед зажиганием электрической дуги и замыкании электропроводов накоротко возникает недопустимо большой ток (в 15—20 раз больше номинального).

В трансформаторах для сварки электрической дугой вторичное напряжение меняется от $U_{2x} = 70$ В при холостом ходе до $U_{2к} = 0$ при коротком замыкании, когда электрод касается свариваемой детали. Ток $I_{2к}$ в последнем случае не должен превышать рабочий ток I_2 более чем на 20—

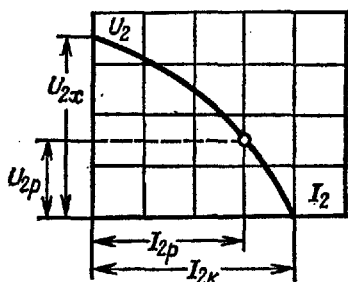


Рис. 9-15. Внешняя характеристика сварочного трансформатора.

40%. Внешняя характеристика такого трансформатора должна иметь вид, показанный на рис. 9-15. Тогда даже при больших колебаниях напряжения, обусловленных непостоянством сопротивления электрической дуги, ток I_2 будет почти неизменным, что необходимо для доброкачественной сварки. Для получения такого большого падения напряжения во вторичной цепи сварочные трансформаторы

конструируются с обмотками, имеющими большие магнитные потоки рассеяния Φ_r , или комплектуются с отдельным реактором, или снабжаются дополнительной обмоткой на общем магнитопроводе.

При первой форме исполнения (рис. 9-16, а) первичная обмотка 1 рассчитана на стандартные напряжения $U_1 = 220$

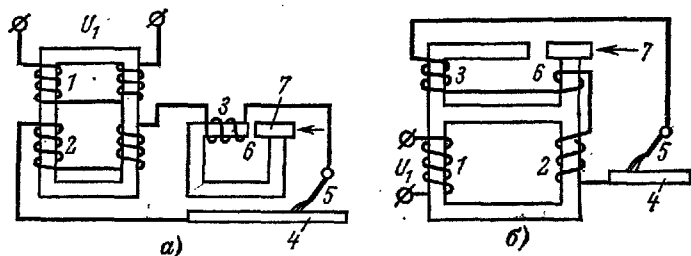


Рис. 9-16. Трансформатор для дуговой сварки.

или 380 В. Вторичная обмотка 2, соединенная последовательно с отдельной реактивной катушкой 3, имеет при холостом ходе напряжение $U_{2x} = 70$ В и при номинальном вторичном токе $I_{2н}$ напряжение $U_2 \approx 30$ В. Сварочный ток между электродом 5 и изделием 4 регулируется изменением воздушного зазора 6 катушки 3 путем перемещения подвижной части сердечника 7.

Вторая форма исполнения (рис. 9-16, б) — однокорпусное. Здесь реактивная катушка 3 и вторичная обмотка 2, расположенные на общем магнитопроводе, связаны магнитно. Подвижная часть магнитопровода 7 для изменения воздушного зазора в обоих исполнениях может перемещаться специальной рукояткой. Коэффициент полезного действия сварочных трансформаторов составляет 83—90%, а $\cos \varphi = 0,52 \div 0,62$.

9-11. Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы применяются в электрических цепях переменного тока для расширения пределов измерений. Кроме того, эти трансформаторы обеспечивают безопасность обслуживающего персонала, отделяя измерительные приборы, катушки реле и т. п. от цепей высокого напряжения. Схема включения амперметра, вольтметра и счетчика энергии через измерительные трансформаторы показана на рис. 9-17.

Все цепи напряжения приборов подключены ко вторичной обмотке измерительного трансформатора напряжения, первичная обмотка которого присоединена к цепи высокого напряжения А, В, С. Вторичная обмотка его рассчитана на номинальное напряжение 100 В. Внешний вид однофазного трансформатора напряжения показан на рис. 9-18. Для защиты трансформатора при случайных коротких замыканиях в цепях обеих обмоток поставлены плавкие предохранители. Коэффициент трансформации его $k_U = U_1/U_2 = w_1/w_2$ можно считать постоянным только в пределах номинальной мощности.

Тогда

$$U_1 = k_U U_2 \quad (9-12)$$

измеряется без ошибки.

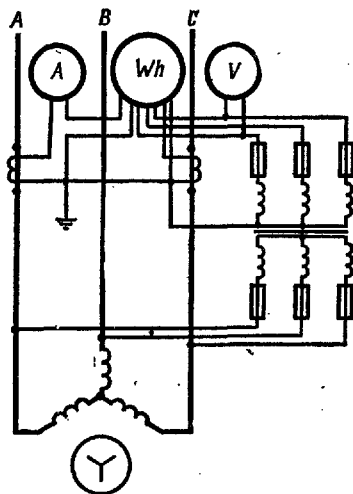


Рис. 9-17. Включение измерительных трансформаторов и приборов.

Цепи тока амперметра, ваттметра и счетчика, включенные последовательно, присоединяются ко вторичным обмоткам трансформаторов тока 2. Эти обмотки рассчитаны на номинальный ток 5 А (рис. 9-17, 9-19). Первичные обмотки трансформатора, имеющие иногда один-два

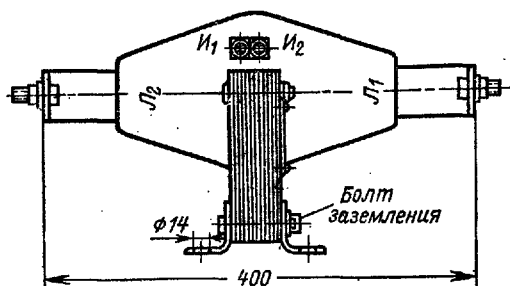


Рис. 9-18. Измерительный трансформатор напряжения.

витка, включаются последовательно в цепь измеряемого тока. Коэффициент трансформации его

$$k_I = \frac{I_1}{I_2} \approx \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

будет неизменным только тогда, когда суммарное сопротивление обмоток приборов и соединительных проводов не выше допустимого для данного трансформатора. В этом случае

$$I_1 = k_I I_2 \quad (9-13)$$

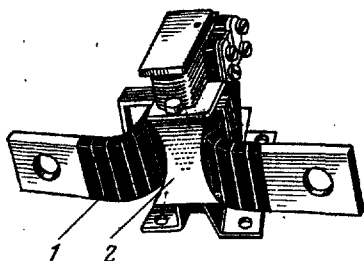


Рис. 9-19. Измерительный трансформатор тока.

Предохранители во вторичных цепях трансформаторов тока не ставятся. Дело в том, что перегорание предохранителя во вторичной цепи вызвало бы исчезновение м. д. с. F_2 при неизменной м. д. с. F_1 . Так как эти м. д. с., будучи во время работы направленными встречно (рис. 9-8), давали очень малую результирующую м. д. с. F_x , то исчезновение м. д. с. F_2 вызовет увеличение F_x до величины F_1 . Тогда магнитный поток трансформатора и э. д. с. вторичной разомкнутой обмотки возрастут до

опасных пределов (возможен перегрев сердечника, пробой изоляции обмотки и поражение током обслуживающего персонала).

Когда измерительные трансформаторы включаются в цепь высокого напряжения, их вторичные обмотки и корпуса заземляются (рис. 9-17).

9-12. Коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициентом полезного действия трансформатора называется отношение отдаваемой активной мощности или мощности на выходе P_2 к подведенной активной мощности на входе P_1

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{ст}} + P_0} 100\%, \quad (9-14)$$

где $P_{\text{ст}}$ — потери в стали, определяемые опытом холостого хода (§ 9-3);

P_0 — потери в обмотках, определяемые опытом короткого замыкания (§ 9-6).

Коэффициент полезного действия трансформатора зависит от его загрузки, так как потери в стали постоянны, а потери в обмотках пропорциональны квадрату тока. Если $S_2/S_n = k_{\text{нг}}$ коэффициент нагрузки, к. п. д. трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{k_{\text{нг}} S_{2\text{n}} \cos \varphi_2}{k_{\text{нг}} S_{2\text{n}} \cos \varphi_2 + P_{\text{ст}} + k_{\text{нг}}^2 P_{0.\text{n}}}, \quad (9-15)$$

где $P_{0.\text{n}}$ — потери в обмотках при номинальном токе, определяемые из опыта короткого замыкания.

Расчеты и опыт показывают, что наибольший к. п. д. у трансформатора будет при коэффициенте нагрузки $k_{\text{нг}} \approx 0,7 \div 0,8$, когда потери в обмотках равны потерям в магнитопроводе.

9-13. Нагрев и охлаждение трансформаторов

При работе трансформатора в его сердечнике и обмотках выделяется тепло. Оно вызывает повышение температуры, отчего происходит быстрое старение изоляции. Тепло должно отводиться в окружающую среду. Допустимая наибольшая температура установлена: для обмоток 105°C , для сердечника на поверхности 110°C и для верх-

них слоев охлаждающего масла 95°C при температуре окружающего воздуха 35°C .

Силовые трансформаторы, как правило, имеют масляное охлаждение, при котором обмотки хорошо охлаждаются и защищены от увлажнения и вредного действия кислорода воздуха. Трансформатор помещают в стальной бак с минеральным маслом. При мощности 20—30 кВ·А бак делают

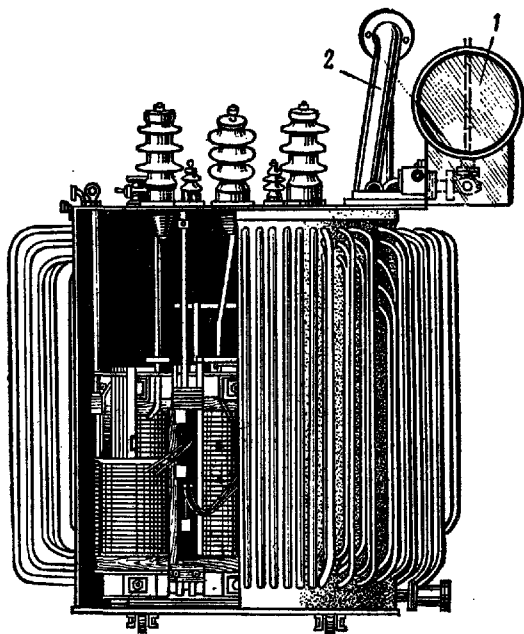


Рис. 9-20. Внешний вид силового трансформатора.

гладким, а для больших мощностей трубчатым для увеличения поверхности охлаждения (рис. 9-20). На верхней крышке бака через проходные изоляторы сделаны выводы обмоток.

При мощности, большей 100 кВ·А, а при напряжении свыше 6 300 В и меньшей мощности бак должен иметь масло-расширитель 1 (рис. 9-20), соединенный с баком трубкой. При нагревании уровень масла в масло-расширителе повышается, а при охлаждении падает. Емкость масло-расширителя должна при всех нагрузках и изменении температуры окружающего воздуха от -35 до $+35^{\circ}\text{C}$ обеспечить наличие масла в основном баке. Уровень масла контролируется маслоуказателем.

При мощности $S \geq 1\,000$ кВ·А трансформаторы имеют выхлопную трубу 2, соединенную с баком и закрытую снаружи стеклянной мембраной. При аварии трансформатора газы, образующиеся при испарении масла, выдавливают мембрану, предохраняя бак от разрыва.

9-14. Лабораторная работа. Однофазный трансформатор

Перед выполнением работы ознакомиться с содержанием § 9-3, 9-5, 9-6, 9-12.

Описание работы

Для проведения работы собирается схема по рис. 9-6. Чтобы получить данные опыта холостого хода, размыкают рубильник P_2 , и при замкнутом рубильнике P_3 включают рубильник P_1 . Подведенное напряжение должно быть для трансформатора номинальным или близким к нему. Разомкнув рубильник P_3 , измеряют I_x , P_x , U_{1x} и U_{2x} . При измерении мощности P_x вольтметр во вторичной цепи должен быть отключен.

Для опыта короткого замыкания подводимое напряжение U_K должно быть таким, чтобы в первичной обмотке установился ток $I_1 = I_{1н}$. Вторичную обмотку рекомендуется замкнуть накоротко проводом возможно малого сопротивления и амперметр в ее цепь не включать.

П л а н р а б о т ы

1. Ознакомиться с трансформатором и записать основные технические данные его и измерительных приборов. Собрать схему и показать ее преподавателю.

2. Включить трансформатор вхолостую и измерить U_{1x} и U_{2x} , I_{1x} и P_x . Подсчитать коэффициент трансформации, потери в стали и отношение $(I_{1x}/I_{1н})100\%$.

3. Произвести опыт короткого замыкания и измерить: $U_{1к}$; P_K и $I_{1к} = I_{1н}$.

4. Подсчитать $(U_{1к}/U_{1н})100\%$ при $I_{2н}$.

5. Подсчитать к. п. д. трансформатора при $I_1 = I_{1н}$ и при а) $\cos \varphi = 1$ и б) $\cos \varphi_2 = 0,8$.

6. Сделать заключение по выполненной работе.

Глава десятая

Электрические машины переменного тока

10-1. Назначение машин переменного тока. Асинхронные электродвигатели

Электрическая энергия получается, передается и используется, как правило, при помощи трехфазной системы токов. На электростанциях механическая энергия преобразуется в электрическую синхронными генераторо-

рами. Для преобразования электрической энергии в механическую в различных силовых установках применяют главным образом, асинхронные электродвигатели.

В 1889 г. М. О. Доливо-Добровольским был изобретен трехфазный асинхронный двигатель, в котором используется вращающееся магнитное поле. С тех пор этот электродвигатель, получивший наибольшее среди электрических машин распространение, сохраняет почти без изменения детали своей конструкции. Будучи прост, дешев и надежен в эксплуатации, этот двигатель имеет хорошие механические характеристики и строится на мощности от долей ватт до тысяч киловатт при напряжениях 127, 220, 380, 500, 660, 3 000, 6 000 и 10 000 В. Он применяется для привода машин и механизмов, не требующих строго постоянной частоты вращения и регулирования ее. В бытовых электроустановках — холодильниках, полотерах, стиральных машинах и др. обычно применяют однофазные асинхронные двигатели.

10-2. Получение вращающегося магнитного поля

На рис. 10-1 представлен неподвижный полый цилиндр (статор), собранный из стальных дисков, на внутренней поверхности которого имеются шесть пазов.

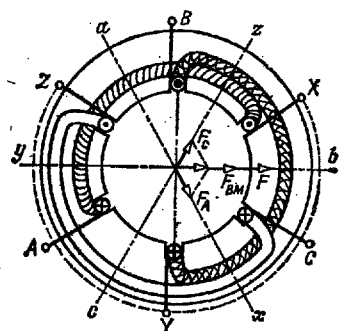


Рис. 10-1. Принцип устройства трехфазной обмотки.

Если соединить концы обмоток X, Y, Z вместе, а зажимы A, B, C. подключить к трехфазной сети, то получится трехфазная обмотка, обтекаемая тремя токами, временная диаграмма которых представлена на рис. 10-2. Условимся считать положительными

В пазы заложены активные стороны секций, подобные показанным на рис. 4-9 и 10-4—10-6; лобовые части этих секций располагаются на торцах цилиндра. Как можно видеть, ось by обмотки BY смещена в пространстве относительно оси ax обмотки AX на 120° . Ось cz обмотки CZ смещена на 120° относительно оси by или на 240° относительно оси ax в том же направлении. Если соединить концы обмоток X, Y, Z вместе, а зажимы A, B, C. подключить к трех-

токи, направленные в активных сторонах обмоток A, B, C (рис. 10-1) из-за плоскости чертежа к зрителю. Тогда для любого момента времени t (рис. 10-2) можно на рис. 10-1 найти в активных сторонах обмотки величину и направление токов, а по правилу буравчика — направление м. д. с. обмоток. Суммарная м. д. с. F трех обмоток находится, как результирующая трех переменных м. д. с.

Для момента времени a (рис. 10-2) ток в обмотке BY максимален $i_B = I_{Bm}$, и, следовательно, м. д. с. $F_B = F_{Bm} = I_{Bm} \omega_{BY}$. Направление ее, определенное по правилу буравчика, совпадает с осью by обмотки BY (рис. 10-1).

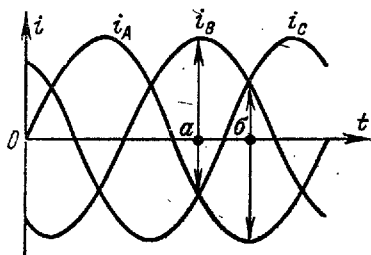


Рис. 10-2. Кривые токов трехфазной системы.

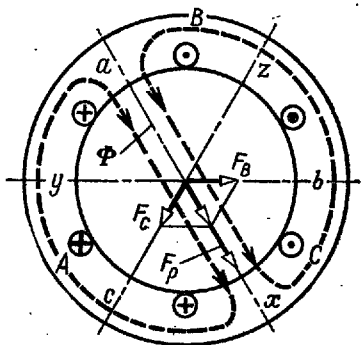


Рис. 10-3. Сложение м. д. с. для момента времени b — рис. 10-2.

Магнитодвижущая сила обмотки AX — F_A направлена по оси своей обмотки ax , но равна $0,5 F_{Bm}$, так как $i_A = 0,5 I_{Bm}$. Точно так же $F_C = 0,5 F_{Bm}$ и направлена по оси cx . Таким образом, суммарная м. д. с. трехфазной обмотки

$$F_1 = F_A + F_C + F_{Bm} = 1,5 F_{Bm} \quad (10-1)$$

и совпадает по направлению с осью by обмотки BY .

На рис. 10-3 показано положение м. д. с. F для момента времени b (рис. 10-2), т. е. через $1/6$ периода. Оказывается, что м. д. с. F повернулась за время $1/6$ периода на $1/6$ окружности, сохранив свою величину $1,5 F_{Bm} = 1,5 F_{Am}$. По направлению она совпадает с осью ax обмотки AX , где $i_A = I_{Am}$.

Таким образом, три обмотки, смещенные в пространстве на 120° друг относительно друга, при токах в них, сдвинутых по фазе на 120° , создают вращающуюся м. д. с., сохраняющую постоянное значение F , в 1,5 раза большее

максимального значения пульсирующей м. д. с. одной фазы и совпадающую по направлению с осью той обмотки, в которой ток максимален.

Вращающаяся м. д. с. статора возбуждает в магнитной цепи машины вращающееся магнитное поле с числом полюсов $2p$, зависящим от конструкции обмотки статора.

Частота вращения магнитного поля

$$n_i = \frac{60f_1}{p}, \text{ об/мин.}$$

Эта частота вращения называется синхронной.

Каждая фаза обмотки статора сцеплена с магнитным потоком, который вследствие вращения магнитного поля непрерывно изменяется во времени от $\Phi = 0$ до $\Phi = \Phi_m$. Этот общий поток, который в 1,5 раза больше амплитуды пульсирующего потока каждой фазы, наводит в обмотках статора и ротора электродвижущие силы e_1 и e_2 . Любой металлический цилиндр с обмоткой или без нее, помещенный в статоре, начнет вращаться вслед за магнитным полем, о чем сказано в § 10-4 и 10-5.

10-3. Обмотка статора асинхронного электродвигателя

Обмотка статора электродвигателя выполняется несколько сложнее, чем было показано на рис. 10-1. Каждая фаза трехфазной обмотки состоит из отдельных секций,

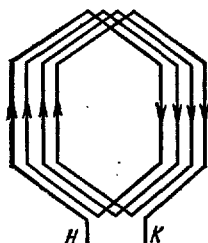


Рис. 10-4. Секция обмотки статора.

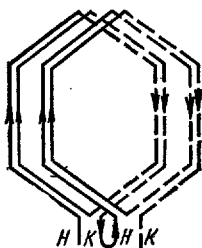


Рис. 10-5. Соединение двух секций.

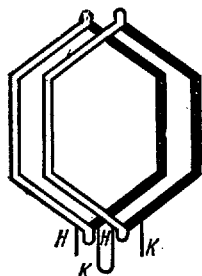


Рис. 10-6. Обозначение секций.

подобных секциям якоря машины постоянного тока (см. рис. 4-9).

На рис. 10-4 показана секция, состоящая из четырех витков, которой на статоре будут заняты два паза. Эти же четыре витка можно разбить на две секции, как показано

на рис. 10-5. Их соединяют последовательно для того, чтобы э. д. с. секций складывались. Все провода секций изолируются вместе и в дальнейшем каждая секция будет изображаться одновитковой независимо от числа ее витков (рис. 10-6).

Активные стороны секций могут помещаться в пазах в один слой (рис. 10-1) или, чаще, в два слоя, как в якоре машины постоянного тока (рис. 4-8, 4-10).

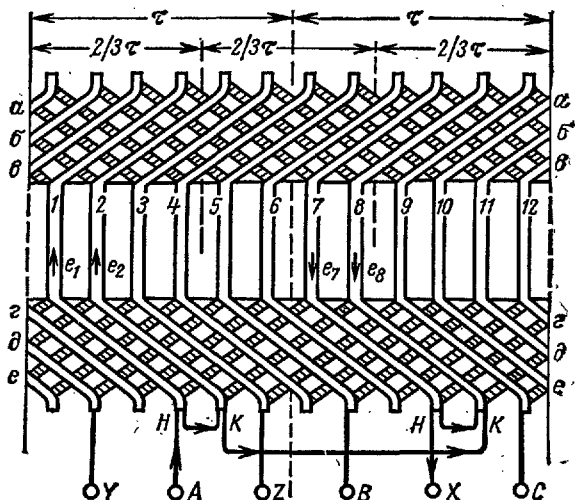


Рис. 10-7. Развертка двухслойной обмотки.

Покажем, как подсчитывается число пазов статора для трехфазной обмотки электродвигателя. Если число полюсов машины $2p$, число фаз $m = 3$, то от каждой фазы на каждый полюс должно приходиться некоторое число пазов $q = 1, 2, 3, 4, 5$, которым задаются при расчете машины. Тогда все число пазов статора равно:

$$Z = 2p m q. \quad (10-2)$$

Пусть задано, что $2p = 2$, $m = 3$, $q = 2$. Все число пазов $Z = 2p m q = 2 \cdot 3 \cdot 2 = 12$. Если обмотка двухслойная, то число секций тоже равно 12. Такая обмотка показана на рис. 10-7. На каждую фазу приходится $Z/3 = 12/3 = 4$ секции, сгруппированные в две катушки, расположенные в сфере действия разноименных полюсов, т. е. на двух полюсных делениях τ . Полюсное деление всегда равно 180° эл.

Разбивка пазов по фазам производится следующим образом. Так как $q = 2$, то произвольно можно считать, что на первом полюсном делении фазе A принадлежат пазы 1, 2. На втором полюсном делении фазе A принадлежат пазы

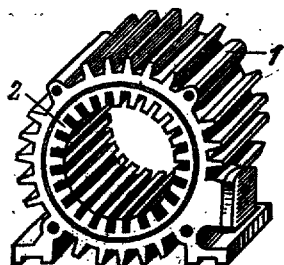


Рис. 10-8. Статор асинхронного двигателя без обмотки.

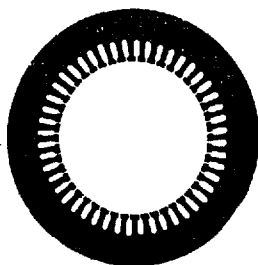


Рис. 10-9. Стальной лист сердечника статора.

7, 8, так как $\tau = Z/2p = 12/2 = 6$ зубцов. Фаза B сдвинута в пространстве на 120° эл., или на $\frac{2}{3}\tau$, т. е. на $6 \cdot \frac{2}{3} = 4$ зубца, и занимает пазы 5, 6 и 11, 12. Разметка ведется по верхнему слою активных сторон. Очевидно, фаза C расположена в остальных пазах — 8, 9 и 3, 4. Для того чтобы

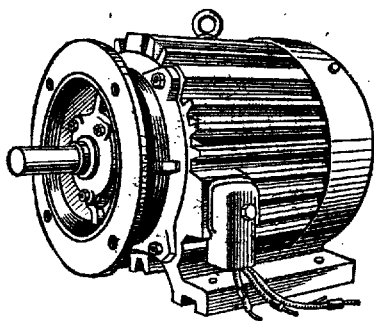


Рис. 10-10. Трехфазный асинхронный короткозамкнутый двигатель.

в. д. с. фазы складывались, секции соединяют в катушки последовательно — конец первой с началом второй, а катушки встречно — конец первой с концом второй (рис. 10-7), например:

$$e_A = e_1 + e_2 - (-e_7 - e_8) = e_1 + e_2 + e_7 + e_8.$$

Для присоединения обмотки к трехфазной сети ее соединяют в звезду или в треугольник.

Статор асинхронного электродвигателя без обмотки показан на рис. 10-8. Он имеет внешний чугунный, алюминиевый или стальной корпус 1 с запрессованным в него сердечником 2, собранным из штампованных стальных листов (рис. 10-9). Листы изолированы друг от друга специальным

лаком. У двигателей закрытого типа внешняя ребристая поверхность статора обдувается вентилятором для лучшего охлаждения. Двигатель в собранном виде показан на рис. 10-10.

10-4. Обмотка ротора асинхронного двигателя

Внутри статора двигателя (рис. 10-8) помещается его вращающаяся часть — ротор (рис. 10-11). Это цилиндр, набранный из стальных листов, как и статор, на поверхности которого имеются пазы. В пазы укладывается обмотка (медные стержни), замкнутая на торцах мед-

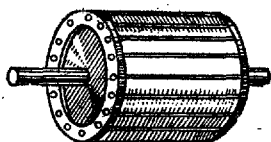


Рис. 10-11. Ротор короткозамкнутого двигателя.

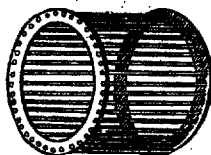


Рис. 10-12. Беличье колесо.

ными кольцами. Пазы в этом случае круглого сечения, а обмотка, показанная отдельно на рис. 10-12, имеет вид клетки, называемой «беличьим колесом». Пазы могут быть и другого типа (рис. 10-13), а короткозамкнутая обмотка

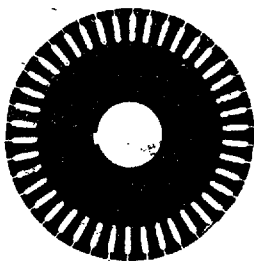


Рис. 10-13. Стальной лист ротора.

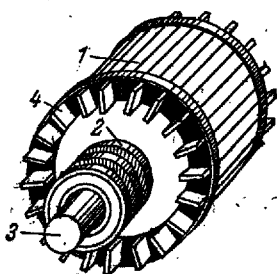


Рис. 10-14. Ротор асинхронного двигателя с обмоткой.

получается заливкой пазов алюминием; одновременно на торцах отливаются и короткозамыкающие кольца с лопастями для вентилятора. Электродвигатели такого типа называются короткозамкнутыми (рис. 10-10). Обмотка ротора короткозамкнутого двигателя является *многофазной*.

В пазах ротора (рис. 10-13) может быть уложена также обмотка, подобная обмотке статора (рис. 10-7). Такой ротор показан на рис. 10-14. В этом случае три вывода от обмотки, лежащей в пазах 1, присоединяются к трем контактным кольцам 2, насаженным на вал 3, изолированным

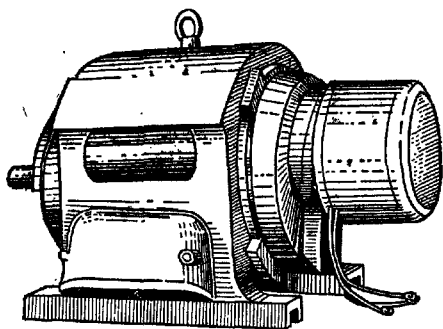


Рис. 10-15. Трехфазный асинхронный двигатель с кольцами.

друг от друга и от вала. При помощи щеток, наложенных на кольца, обмотка ротора присоединяется к реостату, который служит для пуска двигателя или для регулирования его скорости. Двигатель в этом случае называется двигателем с фазным ротором или с кольцами и показан на рис. 10-15.

10-5. Принцип действия асинхронного двигателя

Наведенные вращающимся магнитным полем э. д. с. ротора создают в замкнутых его проводниках вторичные токи i_2 , которые взаимодействуют с вращающимся магнитным полем статора. На проводники ротора действуют электромагнитные силы, направленные касательно к поверхности ротора (правило левой руки). В результате сложения электромагнитных сил и их моментов на валу ротора возникает суммарный *электромагнитный момент*, приводящий ротор в движение в направлении вращения магнитного поля статора.

Частота вращения ротора n_2 должна быть меньше частоты вращения поля статора n_1 , так как только при этом условии магнитное поле статора будет двигаться относи-

тельно движущихся в ту же сторону проводников ротора и наводить в них необходимые для работы вторичные токи i_2 .

По этой причине двигатель называется а с и н х р о н н ы м.

Относительное отставание частоты вращения ротора от частоты вращения магнитного поля статора называется с к о л ь ж е н и е м:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \text{ или } s\% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100\%. \quad (10-3)$$

Скольжение асинхронного двигателя может изменяться от 1 или 100%, когда ротор неподвижен, до 0, когда ротор вращается со скоростью поля. Чем больше нагрузка на валу, тем больше s , так как только при этом условии э. д. с. E_2 , ток I_2 , а значит, и вращающий момент ротора будут большими. Номинальное скольжение асинхронных двигателей составляет от 1 до 6%. При холостом ходе ($P_2 = 0$) скольжение практически равно нулю.

При холостом ходе двигателя ток ротора I_2 относительно мал. При нагрузке на валу ($P_2 \neq 0$) он увеличивается. Результирующий магнитный поток машины Φ создается совместным действием м. д. с. F_1 и F_2 , так же как и в трансформаторе (§ 9-4, рис. 9-8). Однако сложение м. д. с. F_1 и F_2 возможно только тогда, когда они неподвижны друг относительно друга, как в трансформаторе. Покажем, что в асинхронном двигателе м. д. с. F_1 и F_2 также взаимно неподвижны, но обе вращаются в пространстве со скоростью n_1 , т. е. синхронно.

Частота тока в статоре $f_1 \equiv n_1$, а в роторе $f_2 \equiv (n_1 - n_2)$

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} = \frac{pns}{60} = f_1 s. \quad (10-4)$$

При неподвижном роторе $f_2 = f_1 \cdot 1 = f_1$. При синхронной скорости $f_2 = f_1 \cdot 0 = 0$. При вращении под полной нагрузкой ($I_1 = I_{1н}$), когда, например $s_n = 2 \div 4\%$, частота $f_2 = f_1 s = 50 \cdot 0,02 \div 50 \cdot 0,04$, т. е. 1—2 Гц.

Ток статора I_1 создает в обмотке статора м. д. с. F_1 , вращающуюся с частотой n_1 , а ток ротора I_2 создает в обмотке ротора м. д. с., вращающуюся вокруг ротора с частотой $n_3 = f_2 \cdot 60/p$. Сам ротор вращается в ту же сторону с частотой n_2 . Поэтому

$$\begin{aligned} n_2 + n_3 &= n_2 + \frac{f_2 \cdot 60}{p} = n_2 + \frac{f_1 s \cdot 60}{p} = \\ &= n_2 + n_1 s = n_2 + n_1 \frac{n_1 - n_2}{n_1} = n_1. \end{aligned}$$

Таким образом, для асинхронного двигателя — трансформатора с вращающейся вторичной обмоткой — применимы все соображения, приведенные в § 9-4, которые в дальнейшем и используются.

Следует отметить (рис. 9-7), что в трансформаторе ток $I_x = (4 \div 10)\% I_n$, а в асинхронном двигателе, благодаря воздушному зазору между статором и ротором, $I_x = (20—40)\% I_{1n}$.

10-6. Электродвижущие силы в обмотках статора и ротора

При неподвижном роторе вращающимся магнитным полем в каждой фазе обмоток статора и ротора наводятся э. д. с.:

$$E_1 = 4,44 f_1 \omega_1 \Phi k_{o1}; \quad (10-5)$$

$$E_2 = 4,44 f_1 \omega_2 \Phi k_{o2}. \quad (10-6)$$

При работе двигателя в зависимости от нагрузки на его валу (тормозного момента) частота вращения ротора n_2 и скольжение s изменяются.

Поэтому частота э. д. с. (тока) ротора $f_2 = f_1 s$ может иметь различные значения, а следовательно, и электродвижущая сила в каждой фазе вращающегося ротора будет изменяться. Ее величина

$$E_{2s} = 4,44 f_2 \omega_2 \Phi k_{o2},$$

или

$$E_{2s} = 4,44 f_1 \omega_2 \Phi k_{o2} s. \quad (10-7)$$

прямо пропорциональна скольжению. Электродвижущую силу вращающегося ротора принято выражать через э. д. с. неподвижного ротора, что можно сделать, взяв их отношение

$$\frac{E_{2s}}{E_2} = \frac{f_2}{f_1} = \frac{f_1 s}{f_1} = s.$$

Тогда

$$E_{2s} = E_2 s. \quad (10-8)$$

Следовательно, э. д. с. ротора в больших пределах меняется в процессе работы двигателя. При $s = 1$ имеем $E_{2s} = E_2$, а при $s = 0$ получаем $E_{2s} = 0$.

10-7. Сопротивления обмотки ротора

Во время работы, кроме общего магнитного потока Φ , связывающего обе обмотки, существуют отдельные потоки обмоток, называемые потоками рассеяния Φ_{σ} .

(рис. 10-16). Они обуславливают реактивные сопротивления x_1 и x_2 . Когда ротор неподвижен, величина x_2 , а равно и x_1 , находится так же, как и для трансформатора (§ 9-3), т. е.

$$x_2 = \omega_1 L_2 = 2\pi f_1 L_2.$$

При вращении ротора

$$x_{2s} = 2\pi f_1 s L_2.$$

Поэтому, взяв отношение

$$\frac{x_{2s}}{x_2} = \frac{f_1 s}{f_1} = s,$$

находят выражение реактивного сопротивления вращающегося ротора через это же сопротивление при неподвижном роторе

$$x_{2s} = x_2 s. \quad (10-9)$$

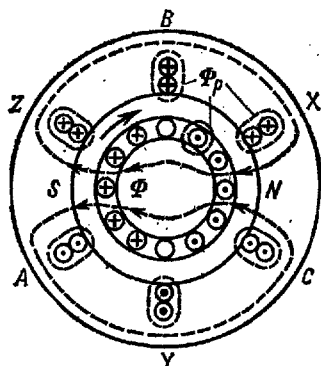


Рис. 10-16. Работа асинхронного двигателя при активном токе в роторе.

При изменении режима работы x_{2s} все время меняется от $x_{2s} = x_2 s = x_2 \cdot 1 = x_2$ до $x_{2s} = x_2 s = x_2 \cdot 0 = 0$.

Активное сопротивление r_2 можно в двигателях нормального исполнения при $f_2 = 0 \div 50$ Гц считать неизменным и не зависящим от частоты вращения.

10-8. Токи в обмотке ротора

Ток в обмотке фазы ротора определяется величинами э. д. с. и сопротивлений ротора:

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}}. \quad (10-10)$$

При изменении частоты вращения он изменяется по величине в зависимости от E_{2s} и $z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}$ и по фазе в зависимости от соотношения r_2 и x_{2s} . При пуске, когда ротор еще неподвижен, ток $I_{2п}$ наибольший, так как при $s = 1$ э. д. с. $E_{2s} = E_2$ будет наибольшей. Сдвиг тока по фазе относительно E_2 также наибольший, поскольку $x_2 \approx (8 \div 10) r_2$. Когда ротор начал вращаться, величина тока и сдвиг по фазе уменьшаются.

10-9. Вращающий момент двигателя

Вращающий момент любого электродвигателя переменного тока определяется его потоком Φ и активной слагающей тока:

$$M = k_m \Phi I_2 \cos \psi_2, \quad (10-11)$$

где k_m — постоянная величина, зависящая от конструктивных данных двигателя.

На рис. 10-17 приведена схема включения короткозамкнутого асинхронного двигателя. При включении рубильника ток ротора $I_{2п}$ будет вначале максимален, так как

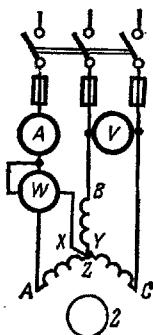


Рис. 10-17. Схема короткозамкнутого асинхронного двигателя.

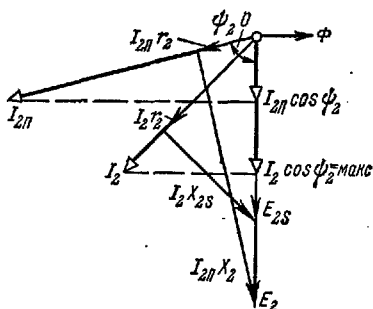


Рис. 10-18. Векторная диаграмма для цепи ротора.

э. д. с. неподвижного ротора наибольшая. Однако пусковой вращающий момент оказывается в 2—2,5 раза меньше максимального. Причина этого в том, что при пуске $x_2 = (8 \div 10) r_2$ и угол ψ_2 между E_2 и $I_{2п}$ близок к 90° . Вследствие этого активная слагающая тока $I_{2п} \cos \psi_2$ очень мала (рис. 10-18). В современных асинхронных двигателях кратность пускового момента $M_{п}/M_{н} = 1 \div 1,5$ при кратности пускового тока $I_{2п}/I_{2н} \approx 4,6 \div 6,5$.

В процессе пуска двигателя по мере увеличения скорости n_2 уменьшаются скольжение s и э. д. с. $E_{2с}$, что вызывает уменьшение тока ротора I_2 , но так как индуктивное сопротивление ротора $x_{2с}$ тоже уменьшается, то при неизменном r_2 угол сдвига ψ_2 уменьшается, а активная слагающая $I_2 \cos \psi_2$ растет. Значит, растет и момент M . Так продолжается до тех пор, пока $x_{2с}$ не станет равным r_2 . Прямо-

угольный треугольник падений напряжения становится равнобедренным ($I_2 x_2 = I_2 r_2$) (рис. 10-18) и активная слагающая тока $I_2 \cos \psi_2$ наибольшей, а следовательно, максимальным и вращающий момент ($M = M_m$). При дальнейшем увеличении частоты n_2 сопротивление x_{2s} становится меньше r_2 и последнее на величину тока оказывает большее влияние, так что при дальнейшем уменьшении E_{2s} происходит уже уменьшение $I_2 \cos \psi_2$, а значит, и момента M . Отношение M_m/M_n обычно равно 1,8—2,5 и называется способностью двигателя к перегрузке.

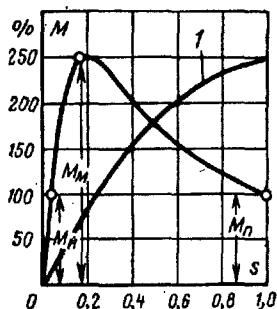


Рис. 10-19. Зависимость вращающего момента двигателя от скольжения.

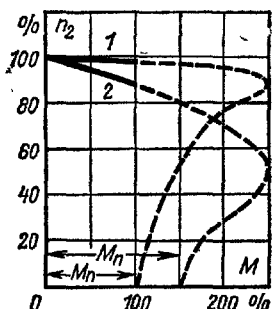


Рис. 10-20. Механические характеристики двигателя.

Как видим, электромагнитный вращающий момент является функцией скольжения $M = f(s)$ при $U_1 = \text{const}$ (рис. 10-19). Номинальный момент M_n двигатель развивает при номинальном скольжении

$$s_n = 0,02 \div 0,06,$$

Наибольший (максимальный) момент M_m двигатель развивает при скольжении, называемом критическим ($s_{кр} \approx 0,2$). При скольжении $s = 1$ двигатель развивает пусковой вращающий момент M_n .

Известно, что магнитный поток Φ приблизительно пропорционален напряжению U_1 , а $M \equiv \Phi I_2 \cos \psi_2$, и так как $I_2 \cos \psi_2 \equiv E_{2s} \equiv \Phi \equiv U_1$, то

$$M \equiv U_1 U_1 \equiv U_1^2. \quad (10-12)$$

Таким образом, вращающий момент асинхронного двигателя при данном скольжении пропорционален квадрату подведенного к статору напряжения. Эта зависимость имеет большое значение для эксплуатации асинхронных

двигателей, так как падение напряжения в сети, например до $0,8 U_{1н}$, вызовет уменьшение максимального момента до $0,8^2 M_{\text{н}} = 0,64 M_{\text{н}}$ и двигатель не сможет преодолеть даже незначительной перегрузки, т. е. остановится.

Зависимость $n_2 = f(M)$ при $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$ называется механической характеристикой (рис. 10-20). Эта характеристика построена в осях $(n_2/n_1) \cdot 100\%$ и $(M/M_{\text{н}}) \cdot 100\%$. Рабочая ее часть в пределах от 0 до $M_{\text{н}}$ показана сплошной линией. Кривая 1, полученная при замкнутом накоротко роторе, называется естественной характеристикой. Эта характеристика такая же жесткая, как у двигателя постоянного тока параллельного возбуждения (рис. 4-26).

Кривая 2 называется искусственной характеристикой. Эта характеристика более мягкая, чем первая, и получается при включении добавочного сопротивления в цепь ротора с фазной обмоткой, что можно использовать для регулирования частоты вращения двигателя (крановые и подъемные устройства).

10-10. Пуск в ход асинхронных двигателей

Согласно стандарту выводы обмоток статора асинхронных двигателей обозначаются: C_1, C_2, C_3 — начала и C_4, C_5, C_6 — концы. Для удобства переключения зажимов обмотки в звезду или треугольник они располагаются на щитке так, как показано на рис. 10-21. Обмотки каждой фазы статора рассчитываются на определенное фазное напряжение $U_{\text{ф}}$. Поэтому статор можно присоединять к двум сетям, номинальные напряжения которых разнятся в $\sqrt{3}$ раз. Например, если $U_{\text{ф}} = 220 \text{ В}$, то при соединении статора в треугольник (рис. 10-21, а) его подключают к сети с напряжением $U_{\text{с}} = 220 \text{ В}$. Если $U_{\text{с}} = 380 \text{ В}$, то обмотки статора этого же двигателя соединяют в звезду (рис. 10-21, б). Другой двигатель таким же образом можно присоединять к сетям, где $U_{\text{с}} = U_{\text{ф}} = 380 \text{ В}$ и $U_{\text{с}} = 660 \text{ В}$.

Короткозамкнутый двигатель включается и выключается простым замыканием и размыканием рубильника (рис. 10-17). Недостатком этого способа пуска является значительный пусковой ток $I_{\text{п}} = (4,5 \div 6,5) I_{\text{н}}$ при относительно малом пусковом моменте $M_{\text{п}} = (1 \div 1,5) M_{\text{н}}$.

Для улучшения пусковых свойств короткозамкнутых двигателей вместо круглых пазов ротора (рис. 10-22, а) применяются более глубокие пазы (рис. 10-22, б). При

этом в момент пуска, когда $f_2 = f_1$, вследствие вытеснения тока к поверхности провода активное сопротивление ротора увеличено, что влечет за собой увеличение активной составляющей тока $I_{2п} \cos \psi_2$ (рис. 10-18), а следовательно, и начального пускового момента $M_{п}$. При мощности двигателей более 120—150 кВт пазы выполняются в виде узких глубоких щелей (рис. 10-22, в).

Если статор двигателя должен быть соединен в треугольник, то для уменьшения пускового тока его можно пере-

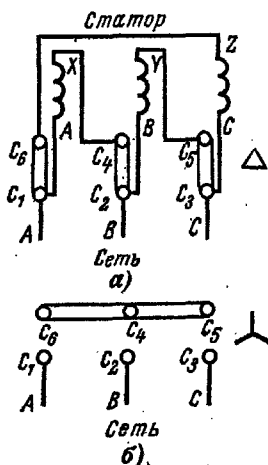


Рис. 10-21. Расположение зажимов обмотки статора.

ключить при пуске на звезду (рис. 10-23). Замкнув ножи переключателя 2 вниз, включают рубильник 1. Двигатель начинает вращаться при пониженном в $\sqrt{3}$ раз напряжении U_{ϕ} и при уменьшенном в 3 раза токе I_1 . После пуска

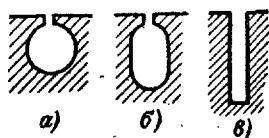


Рис. 10-22. Пазы роторов асинхронных двигателей.

ножи переключателя перекидывают в верхнее положение и двигатель работает при $U_1 = U_n$. Такой пуск можно производить только вхолостую, например для привода вентилятора или насоса. Дело в том, что начальный момент вращения при этом способе пуска уменьшается в $\sqrt{3}$. $\sqrt{3} = 1.732$.

Схема пуска двигателя с фазным ротором показана на рис. 10-24. Подвижные контакты 5 реостата 1 проводами присоединены к щеткам 3, наложенным на контактные кольца 2 ротора. Убедившись, что сопротивление реостата наибольшее (пуск), включают рубильник 4, и ротор начинает вращаться. Введение сопротивления r_p в цепь ротора позволяет уменьшить пусковой ток в роторе, а значит, и в статоре, до желаемой величины. Кроме того, увеличив

активное сопротивление до величины $r_2 + r_p = x_2$, при пуске получают максимальными $I \cos \psi_2$ и момент (рис. 10-18), как показано на рис. 10-19 кривой 1. Следовательно,

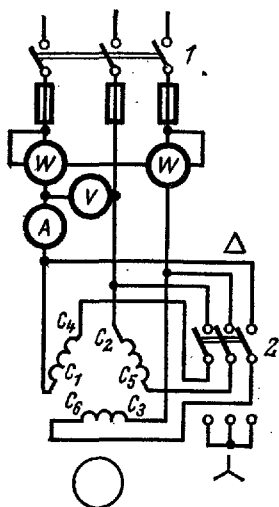


Рис. 10-23. Пуск двигателя переключением статора со звезды на треугольник.

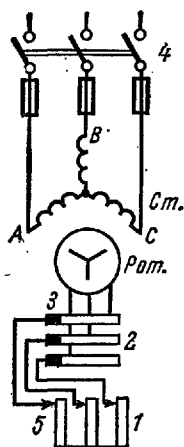


Рис. 10-24. Схема асинхронного двигателя с кольцами.

по этой схеме возможен пуск полностью нагруженного двигателя.

При остановке двигателя введение реостата в цепь ротора не требуется.

10-11. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя

Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя с помощью реостата в цепи ротора сопряжено с большими потерями энергии в реостате. Такое регулирование может осуществляться только в двигателе с кольцами. Принцип регулирования можно объяснить с помощью рис. 10-25, где изображены двигатель и его энергетическая диаграмма, на которой в виде потока показана поступающая из сети мощность P_1 . Вращающееся магнитное поле передает на ротор электромагнитную мощность $P_{вм} = P_1 - P_{ст} = M\omega_1$, где $P_{ст}$ — потери в статоре, а ω_1 — синхронная угловая скорость ($\omega_1 = \pi n_1/30$). Мощ-

ность на валу $P_2 = P_{\text{вм}} - P_{\text{рот}} = M\omega_2$, где $P_{\text{рот}}$ — потери в обмотке ротора. Если в цепь ротора двигателя, работающего при $M = \text{const}$, включить реостат, то мощность на валу $P'_2 = P_{\text{вм}} - (P_{\text{рот}} + P_{\text{р}}) = M\omega'_2$, где $P_{\text{р}}$ — мощность потерь в реостате. Теперь ясно, что $\omega'_2 < \omega_1$ и процент снижения скорости равен проценту потерь в реостате, что очень неэкономично.

Частота вращения короткозамкнутых двигателей может регулироваться при изменении частоты f_1 или числа пар полюсов p , так как

$$n_1 = f_1 60/p.$$

Изменение частоты f_1 возможно только в специальных установках и применяется относительно редко. Для регулирования скорости изменением числа полюсов выпускаются многоскоростные двигатели (двух-, трех- и четырехскоростные). Обмотки статора таких двигателей обычно состоят из двух равных частей в каждой фазе. Эти части при помощи переключателя могут переключаться последовательно или параллельно. При этом вследствие перераспределения токов изменяется число полюсов магнитного поля, отчего изменяется частота его вращения n_1 (3 000—1 500 и 1 000—500 об/мин). Регулирование получается ступенчатое. Двигатели эти применяются для привода некоторых станков, что позволяет упростить коробку скоростей станков.

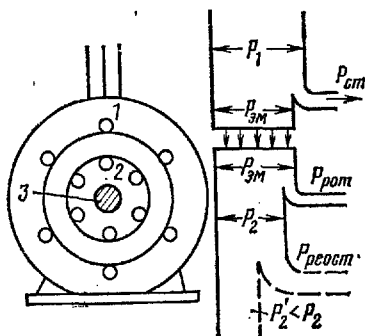


Рис. 10-25. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя.

10-12. Однофазный асинхронный двигатель

Если у трехфазного асинхронного двигателя, работающего с нагрузкой до 60% номинальной, отключить одну из фаз сети, то он не остановится, несмотря на то, что в его обмотке будет протекать однофазный ток. Однако пуск трехфазного двигателя при обрыве одной фазы, даже вхолостую, невозможен. Причины этого явления можно объяснить следующим.

Вращающийся двигатель при обрыве одной фазы не останавливается, очевидно, потому, что существует магнитный поток, вращающийся в направлении вращения ротора с частотой n_1 . Этот поток называется **прямым** $\Phi_{пр}$. При попытке пустить двигатель на однофазном токе ротор не двигается потому, что в это время существует еще один поток, такой же амплитуды, как $\Phi_{пр}$, но вращающийся с частотой n_1 в обратную сторону. Этот поток называется **обратным** $\Phi_{обр}$ *. Тогда результирующий пусковой момент $M = M_{пр} + (-M_{обр}) = 0$.

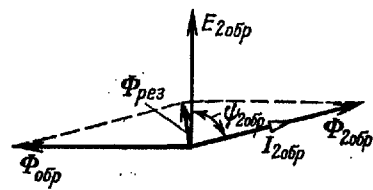


Рис. 10-26. Диаграмма компенсации обратновращающейся м. д. с.

Вращение ротора при однофазном токе в статоре можно объяснить лишь тем, что в этом режиме один из моментов больше другого и результирующий момент $M = M_{пр} - M_{обр} > 0$. В этом легко убедиться при рассмотрении диаграммы для цепи ротора (рис. 10-26).

Прямой поток создает в роторе, вращающемся с частотой n_2 , э. д. с. $E_{2пр}$ и ток $I_{2пр}$, а в результате — вращающий момент $M_{пр}$, как в трехфазном двигателе. При этом скольжение $s_{пр}^* = (n_1 - n_2)/n_1 \approx 0$, так как $n_2 \approx n_1$.

Обратный поток вращается по отношению к ротору с частотой $n_1 + n_2 \approx 2n_1$, т. е. при скольжении $s_{обр} = (n_1 + n_2)/n_1 \approx 2$. Частота $E_{2обр}$ и $I_{2обр}$, наведенных обратным потоком в роторе, примерно равна $2f_1$. При этом сопротивление ротора $x_{2обр} = 2\pi f_2 L_2$ так велико, что ток $I_{2обр}$ отстает от э. д. с. на угол $\psi_2 \approx 90^\circ$.

Обратный ток $I_{2обр}$ создает свой поток $\Phi_{2обр}$. Он в фазе с $I_{2обр}$ и почти в противофазе с потоком $\Phi_{обр}$. Поэтому результирующий обратный поток $\Phi_{рез}$ ничтожно мал и $M = M_{пр} - M_{обр} \approx M_{пр}$.

На рис. 10-27 показана схема однофазного асинхронного двигателя, получившего при-

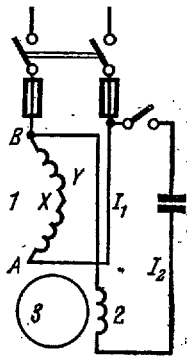


Рис. 10-27. Схема однофазного асинхронного двигателя.

* Переменный (пульсирующий) магнитный поток, изменяющийся от $\Phi = 0$ до $\Phi = \Phi_m$, можно разложить на два потока, вращающихся в противоположные стороны с частотой вращения, равной частоте пульсаций переменного потока.

менение главным образом при мощности менее 0,5 кВт. Ротор 3 двигателя короткозамкнутый, а однофазная обмотка 1 статора, подобная двум фазам трехфазной обмотки, обтекается переменным током I_1 . Для пуска двигателя искусственно создается двухфазная система токов, для чего имеется вспомогательная обмотка 2, сдвинутая в пространстве относительно рабочей на 90° . В ней проходит ток I_2 , сдвинутый при помощи конденсатора по фазе относительно тока I на 90° . При замыкании обоих рубильников токи обеих обмоток создают вращающееся магнитное поле, взаимодействие которого с ротором обеспечивает вращающий момент, отчего ротор приводится во вращение. Затем вспомогательная обмотка может быть отключена и двигатель работает как однофазный. Однофазный двигатель по сравнению с трехфазным имеет худшие эксплуатационные качества, меньшие к. п. д. и $\cos \varphi$.

10-13. Потери и к. п. д. асинхронного двигателя

Потери в асинхронном двигателе, показанные на энергетической диаграмме (рис. 10-25), состоят из:

P_{01} — потеря в обмотке статора; $P_{ст 1}$ — потеря в стали статора; P_{02} — потеря в обмотке ротора; $P_{мех}$ — потеря на трение.

Тогда мощность на входе (первичная)

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1. \quad (10-13)$$

Мощность на выходе (на валу)

$$P_2 = P_1 - (P_{01} + P_{ст 1} + P_{02} + P_{мех}) \quad (10-14)$$

и к. п. д. двигателя

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1}. \quad (10-15)$$

Наибольшее значение к. п. д. двигателей наступает при номинальной нагрузке или близкой к ней. На рис. 10-28 показаны рабочие характеристики асинхронного двигателя, которые подобны характеристикам двигателя параллельного возбуждения постоянного тока. Кривые построены в относительных единицах.

При передаче и распределении электрической энергии в цепях переменного тока имеют место ее потери, обуслов-

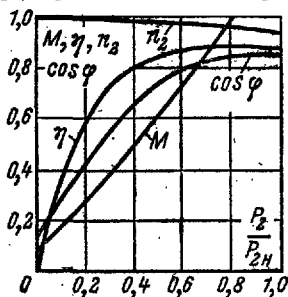


Рис. 10-28. Рабочие характеристики асинхронного двигателя.

ленные нагреванием проводов генераторов, трансформаторов и электрических сетей. Мощность этих потерь пропорциональна квадрату тока $\Delta P_{\text{пр}} = I^2 r_{\text{пр}}$ (§ 6-11), величина которого $I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi}$ обратно пропорциональна коэффициенту мощности $\cos \varphi$ установки. Учитывая, что основными потребителями энергии являются асинхронные двигатели, необходимо, чтобы в процессе их эксплуатации $\cos \varphi$ был по возможности выше. Это достигается наиболее полной нагрузкой двигателя, недопущением работы его при повышенном напряжении и качественным ремонтом.

10-14. Синхронные машины

На современных электрических станциях механическая энергия превращается в электрическую почти исключительно синхронными генераторами.

В этих машинах статор устроен подобно статору асинхронной машины (рис. 10-1, 10-7, 10-29), а ротор, приводимый во вращение паровой или водяной турбиной, несет на себе обмотку возбуждения, обтекаемую постоянным током $I_{\text{в}}$, как у машин постоянного тока.

Создаваемый этим током магнитный поток возбуждения $\Phi_{\text{в}}$ вращается с неизменной частотой n и наводит в трехфазной обмотке статора э. д. с., величина которой определяется, как уже известно, формулой

Создаваемый этим током магнитный поток возбуждения $\Phi_{\text{в}}$ вращается с неизменной частотой n и наводит в трехфазной обмотке статора э. д. с., величина которой определяется, как уже известно, формулой

$$E_0 = 4,44 f \omega \Phi_{\text{в}} k_o.$$

Рис. 10-29. Схема синхронного генератора.

Если зажимы обмотки статора замкнуть на сопротивление, то в фазах обмотки создаются три тока I_A , I_B , I_C , а м. д. с. этих токов F_A , F_B и F_C , суммируясь, как было выяснено ранее (§ 10-2), образуют результирующую м. д. с. F . Эта м. д. с. создает поток статора или якоря $\Phi_{\text{я}}$, вращающийся с одной частотой с ротором. По этому признаку машина называется синхронной.

В синхронной машине жестко связаны частота вращения n , частота тока статора f и число пар полюсов p

$$n = f \cdot 60/p.$$

При $f = 50$ Гц и $p = 1, 2, 3$ частоты вращения ротора $n_1 = 3\,000, 1\,500, 1\,000$ об/мин. Синхронные генераторы, приводимые во вращение паровыми турбинами при $n = 3\,000$,

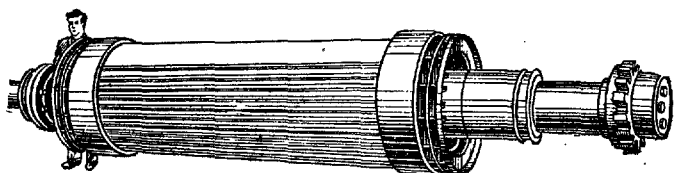


Рис. 10-30. Общий вид ротора турбогенератора.

1 500 об/мин, называются турбогенераторами. Генераторы, которые вращаются гидравлическими турбинами, называются гидрогенераторами. При использовании равнинных рек и водохранилищ гидравлические турбины тихоходны и для получения тока промышленной частоты $f = 50$ Гц число пар полюсов большое. Так, гидрогенераторы Братской ГЭС по 225 000 кВт, 15 750 В, $\cos \varphi = 0,85$ построены на $n = 125$ об/мин при $p = 24$. Гидрогенераторы Красноярской ГЭС на 500 000 кВт, имеют $n = 93,8$ об/мин и $p = 32$.

На рис. 10-29 показаны статор и ротор явнополюсного генератора. В пазах статора 4 положена двухслойная обмотка, подобная рассмотренной выше (рис. 10-7). Четырехполюсный ротор с обмоткой возбуждения 1 приводится во вращение первичным двигателем (на схеме не показан). Ток возбуждения подводится к обмотке 1 при помощи контактных колец 3 через щетки 2 от специальной машины постоянного тока — возбуждателя.

Внешний вид неявнополюсного ротора турбогенератора показан на рис. 10-30, а на рис. 10-31 поперечный разрез ротора без обмотки.

Характеристики: холостого хода генератора $E_0 = f(I_B)$ при $f = \text{const}$, $I = 0$ и внешняя $U = f(I)$ при $I_B = \text{const}$,

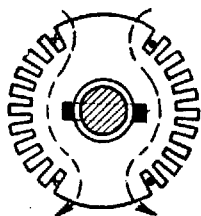


Рис. 10-31. Ротор турбогенератора без обмотки и одна секция обмотки возбуждения.

$\cos \varphi = \text{const}$ подобны таким же характеристикам генератора постоянного тока независимого возбуждения (рис. 4-22). Однако процентное изменение напряжения

$$\Delta U = \frac{E_0 - U_n}{U_n} 100\%$$

у синхронного генератора достигает величины (20—40) % U_n .

Дело в том, что поток реакции якоря $\Phi_{\text{я}}$, показанный замыкающимся поперек полюса (рис. 10-29), как в машине постоянного тока, у синхронной машины при отстающем токе, т. е. при $\cos \varphi < 1$, замыкается частично вдоль полюсов

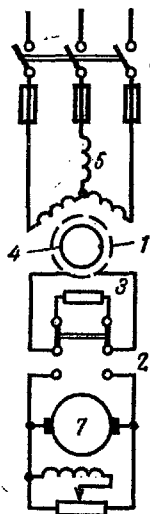


Рис. 10-32. Схема пуска синхронного двигателя.

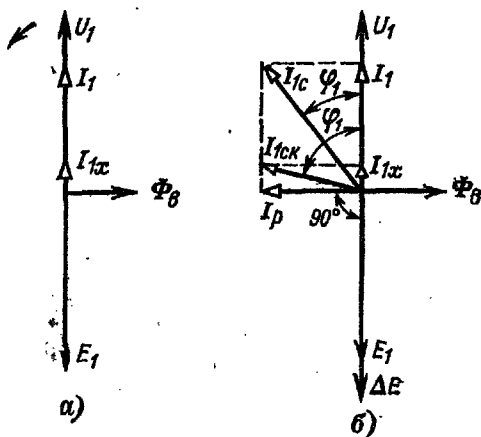


Рис. 10-33. Диаграмма работы синхронного двигателя с перевозбуждением.

встречно потоку $\Phi_{\text{в}}$. Поэтому происходит сильное уменьшение результирующего потока $\Phi = \Phi_{\text{в}} - \Phi_{\text{я}}$ и уменьшение э. д. с. E_0 , а значит, и U .

Синхронная машина может работать и в режиме двигателя для привода механизмов, не создающих резких перегрузок, например, насосов и воздуходувок, с успехом заменяя асинхронные двигатели при мощностях в сотни и тысячи киловатт. При способности к перегрузке $M_{\text{м}}/M_{\text{н}} = 1,8 \div 2,5$ синхронный двигатель обладает ценным свойством работать при $\cos \varphi$, равном единице. На рис. 10-32 показана схема пуска синхронного двигателя. Кроме обмотки возбуждения 1, в полюсных наконечниках ротора за-

ложена короткозамкнутая обмотка 4, как у асинхронного двигателя. Перед пуском обмотка возбуждения 1 замыкается переключателем 2 на сопротивление 3. Статор 5 подключается рубильником 6 к питающей сети и вращающееся магнитное поле статора, наводя токи в короткозамкнутой обмотке ротора 4, разгоняет ротор, как у асинхронного двигателя до частоты вращения $n_2 \approx n_1$. Для того чтобы ротор начал вращаться с частотой n_1 , т. е. синхронно, нужно установить в обмотке 1 постоянный ток. С этой целью перекидывают ножи переключателя 2 вниз, на зажимы возбуждителя 7 и ротор автоматически входит в синхронизм, после чего двигатель можно нагружать.

Диаграмма работы двигателя показана на рис. 10-33. Вращающийся поток ротора Φ_r наводит в обмотке статора противо-э. д. с. E_1 . Если пренебречь активным сопротивлением обмотки, считая $I_1 z_1 \approx I_1 x_1$, то напряжение сети $\bar{U}_1 = -(\bar{E}_1 + \bar{I}_1 x_1) \approx -\bar{E}_1$ (рис. 10-33, а). При холостом ходе мощность $P_x = \sqrt{3} U_1 I_{1x} \cos \varphi_x$ очень мала и равна потерям холостого хода двигателя. Ток холостого хода I_{1x} активный и тоже мал, а $\cos \varphi_x$ при соответствующем возбуждении может быть равен единице. При росте нагрузки на валу ток увеличивается до значения I_1 , оставаясь активным.

Если увеличивать ток возбуждения I_v (рис. 10-33, б), то поток Φ_r растет и э. д. с. увеличивается до значения $E_1 + \Delta E$. Тогда в обмотке статора появляется дополнительный ток

$$I_p = \Delta E / x_1.$$

Этот ток целиком реактивный, так как сопротивление обмотки статора $\bar{z}_1 = \bar{r}_1 + \bar{x}_1 \approx \bar{x}_1$. Ток I_p отстает от ΔE на угол $\psi = 90^\circ$ (рис. 10-33, б) и опережает напряжение U_1 на 90° , а суммарный ток двигателя I_{1c} опережает напряжение U_1 на угол φ_1 .

Очень часто устанавливают режим синхронного компенсатора, когда двигатель работает без нагрузки на валу, но с опережающим током I_{1ck} (рис. 10-33, б). Если такая машина включена в сеть с индуктивной нагрузкой, то она, работая как конденсатор, создает в сети условия, близкие к тем, когда получается резонанс токов (см. § 6-11). Синхронный компенсатор имеет преимущество перед статическим конденсатором в том, что величину опережающего тока можно менять, изменяя ток возбуждения.

При малых мощностях, не превышающих нескольких сот ватт, синхронные двигатели конструируются без обмотки

возбуждения, называются реактивными синхронными двигателями и применяются для привода механизмов, требующих постоянной частоты вращения (звуковое кино, телемеханика).

10-15. Универсальный коллекторный двигатель

На рис. 10-34 показана схема включения универсального коллекторного двигателя. Если присоединить этот двигатель к сети постоянного тока зажимами $+$ и $-$, то он будет работать как обычный двигатель последовательного возбуждения, о характеристиках и свойствах которого было сказано в § 4-17. Известно, что при одновременном изменении направления тока в якоре и в обмотке возбуждения направление вращения якоря не изменяется. Следовательно, серийный двигатель будет вращаться, если его подключить и к сети переменного тока.

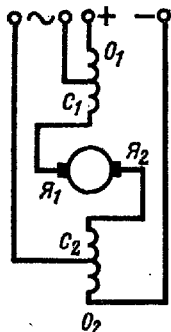


Рис. 10-34. Схема универсального двигателя.

Однако в массивных частях магнитной цепи машины постоянного тока при питании ее переменным током возникнут большие тепловые потери, а обмотка возбуждения для переменного тока будет обладать большим индуктивным сопротивлением. Поэтому универсальные двигатели выполняются со станиной и полюсами, шихтованными из листовой электротехнической стали, как и якорь. Дополнительные полюсов они не имеют. Для уменьшения индуктивного сопротивления при работе на переменном токе под напряжение включается только часть обмотки возбуждения.

Показатели двигателя при работе на переменном токе несколько хуже, чем на постоянном.

10-16. Лабораторная работа. Трехфазный асинхронный электродвигатель

Целью лабораторной работы является изучение рабочих характеристик асинхронного двигателя. Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с содержанием § 10-5, 10-10, 10-13.

Описание работы

Схема включения короткозамкнутого асинхронного электродвигателя показана на рис. 10-23. При пуске с переключением обмоток статора со звезды на треугольник можно наблюдать уменьшение пускового

тока. Для пуска электродвигателя нужно, поставив ножи переключателя 2 в такое положение, при котором статор соединен в звезду, замкнуть трехполюсный рубильник 1. Когда электродвигатель пришел во вращение, переключают статор на треугольник. Пуск электродвигателя производится входостую при номинальном напряжении ($U_1 = U_n$). Записав показания приборов при холостом ходе, можно нагружать электродвигатель до тех пор, пока ток не достигнет I_n . Нагрузка на валу обычно создается механическим тормозом. Записывают пять-шесть значений тока I , мощности P_1 , напряжения U_1 , частоты вращений ротора n_2 и силы на тормозе F . По полученным данным производят вычисления.

Момент M , мощность P_2 и к. п. д. η можно вычислить по формулам, приведенным в § 4-19.

Для пуска электродвигателя с фазным ротором реостат присоединяют по схеме на рис. 10-24, а статор соединяется звездой или треугольником в зависимости от напряжения сети.

П л а н р а б о т ы

1. Ознакомиться с электродвигателем и пусковым приспособлением, записать основные технические данные электродвигателя и электроизмерительных приборов.

2. Собрать схему (рис. 10-23) и показать ее руководителю. Включить короткозамкнутый двигатель при помощи переключателя 2.

3. Снять и построить рабочие характеристики двигателя: I_1 , P_1 , M , s , $\cos \varphi$, η в зависимости от P_2 .

4. Пустить асинхронный двигатель с фазным ротором (рис. 10-24). Изменить направление вращения ротора.

5. Сделать заключение о выполненной работе.

Глава одиннадцатая

Электропривод и аппаратура управления

11-1. Система электропривода

Э л е к т р о п р и в о д о м (электрическим приводом) называется часть машинного устройства, состоящая из электродвигателя аппаратуры управления и передаточного механизма от электродвигателя к рабочей машине. Электропривод с применением автоматизации дает возможность увеличить производительность силовой установки с одновременным повышением качества выпускаемой продукции и улучшением условий труда рабочих.

Правильный выбор мощности двигателя, приводящего в движение машину-орудие (станок, насос, вентилятор, кран и т. д.), имеет очень важное значение. При недостаточной номинальной мощности двигателя в результате перегрузки недопустимо перегревается, что приводит к разрушению изоляции обмоток; завышенная мощность двигателя удорожает установку, снижает к. п. д. и $\cos \varphi$. Выше говорилось о перегрузочной способности двигателя, характеризуемой отношением M_m/M_n .

указывающим на физический предел мощности, которую двигатель способен развивать кратковременно. Во избежание внезапной остановки двигателя тормозной момент на валу электродвигателя со стороны производственного механизма не должен превышать величину M_m .

Величина M_m/M_n в среднем для асинхронных двигателей общепромышленного применения 1,8—2,5, для крановых асинхронных двигателей 2,3—3,3, для синхронных двигателей 1,8—2,5. Допустимая перегрузка двигателей постоянного тока определяется безыскоровой работой коллектора, так как у них при перегрузке ухудшается коммутация и возможно появление кругового огня на коллекторе. С учетом этого у них $M_m/M_n \approx 2,5$, а для крановых двигателей 3,0—4,0.

У электродвигателей следует различать мощности: номинальную, продолжительную, мгновенную перегрузочную и кратковременную перегрузочную.

Номинальную продолжительную мощность, указываемую на щитке, двигатель может развивать произвольно долгое время, не перегреваясь сверх нормы, ограниченной допустимой температурой изоляции обмоток двигателя.

Мгновенная перегрузочная мощность определяется конструкцией и электромагнитными свойствами двигателя.

Кратковременную перегрузочную мощность двигатель может развивать при определенной продолжительности включения (ПВ), не перегреваясь свыше допустимых для его изоляции температур. На щитке таких двигателей указываются кратковременная мощность и время, в течение которого она допустима.

11-2. Нагрев и охлаждение электрических машин

Материалы, применяемые в электромашиностроении для изоляции, в зависимости от нагревостойкости делятся на семь классов.

1. Класс Y. Непропитанные и не погруженные в жидкий электроизоляционный материал хлопчатобумажные ткани и пряжа, бумага и волокнистые материалы из целлюлозы и шелка. Предельно допустимая температура 90°C.

2. Класс A. Материалы класса Y, но пропитанные или погруженные в жидкий электроизоляционный материал. Предельно допустимая температура 105°C.

3. Класс E. Некоторые синтетические органические пленки. Предельно допустимая температура 120°C.

4. Класс B. Изделия из слюды, асбеста, стекловолокна и других неорганических материалов, склеенных или пропитанных органическими вяжущими веществами (смолами или лаками). Предельно допустимая температура 130°C.

5. Класс F. Неорганические материалы из слюды, стекловолокна и асбеста в сочетании с синтетическими склеивающими или пропитывающими составами. Предельно допустимая температура 155°C.

6. Класс H. Материалы класса F, но в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими веществами. Предельно допустимая температура 180°C.

7. Класс C. Слюда, фарфор, стекло, кварц без применения вяжущих веществ или с неорганическими связующими составами. Предельно допустимая температура 180°C и выше.

При температуре окружающей среды $+35^{\circ}\text{C}$ стальные сердечники и другие части, соприкасающиеся с обмотками, при изоляции обмоток классов А и В не должны иметь соответственно превышения температуры (см. ниже) более 65 и 85°C . Контактные кольца при тех же условиях должны иметь температуру не выше 70 и 90° , а коллекторы 65 и 85°C . Температура подшипников скольжения не должна превышать 80°C , а подшипников качения 95°C .

Конечная температура двигателя θ складывается из превышения его температуры τ над температурой окружающей среды и температуры окружающей среды $\theta_0 = 35^{\circ}\text{C}$, т. е. $\theta = \tau + \theta_0$. При меньшей температуре θ_0 возможна некоторая перегрузка двигателя.

11-3. Выбор мощности двигателя при продолжительном режиме

Если двигатель работает при неизменной нагрузке, то номинальная мощность должна быть равна, или несколько больше мощности, потребной для обеспечения нормальной работы приводимого механизма (станок, насос, вентилятор, грузоподъемный кран и др.).

Мощности различных механизмов определяются согласно их производительности по формулам, приведенным в справочниках.

Для определения мощности двигателя, работающего с изменяющейся нагрузкой, необходимо иметь график нагрузки $I = f(t)$ (рис. 11-1).

Плавную кривую графика заменяют ступенчатой линией, полагая, что за время t_1 в двигателе идет ток I_1 , за время t_2 — ток I_2 и т. д. Изменяющийся ток заменяют эквивалентным ему током I_0 , который за время одного цикла работы t_u производит одинаковое тепловое действие с током, изменяющимся ступенями. Тогда

$$I_0^2 r t_u = I_1^2 r (t_1 + t_2 + \dots + t_n) = \\ = I_1^2 r t_1 + I_2^2 r t_2 + \dots + I_n^2 r t_n,$$

а эквивалентный ток

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (11-1)$$

Номинальный ток двигателя должен быть равен эквивалентному току или больше его $I_n \geq I_0$.

У синхронных двигателей и двигателей постоянного тока с параллельным возбуждением, работающих при неизменном потоке возбуждения,

$$M = c_m \Phi I \equiv I.$$

Поэтому эти двигатели можно выбирать по эквивалентному вращающему моменту

$$M_0 = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (11-2)$$

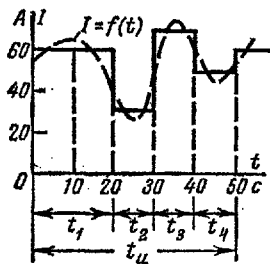


Рис. 11-1. Диаграмма выбора мощности двигателя при продолжительном режиме.

Если двигатель имеет жесткую характеристику и, следовательно, $P = M\omega \equiv M$, то двигатель выбирают по эквивалентной мощности

$$P_s = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}}. \quad (11-3)$$

При наличии в графике переменной нагрузки отдельных кратковременных перегрузок выбранный двигатель должен быть проверен на перегрузочную способность.

11-4. Выбор мощности двигателя при кратковременном режиме

Если двигатель работает такое время t_k , за которое температура его не достигает установившегося значения, а при отключении он успевает охладиться до температуры окружающей среды, то режим работы называют кратковременным (зажимные приспособления металлорежущих станков, шлюзовые устройства, разводные мосты). Тогда в соответствии с

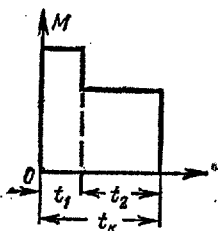


Рис. 11-2. Диаграмма работы двигателя при кратковременном режиме.

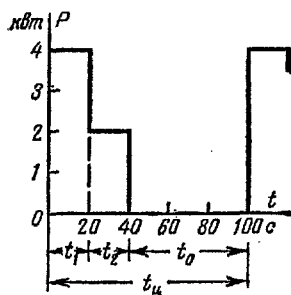


Рис. 11-3. Диаграмма работы двигателя при повторно-кратковременном режиме.

графиком (рис. 11-2) считают, что $t_1 + t_2 + \dots + t_n = t_k$ и по формуле (11-2) определяют M_s . Затем по каталогу выбирают двигатель, предназначенный для времени работы t_k , номинальный момент которого $M_n \geq M_s$. Выбранный двигатель проверяется на мгновенную перегрузку током так, чтобы I_m/I_s было допустимым для этого двигателя.

11-5. Выбор мощности двигателя при повторно-кратковременном режиме

При повторно-кратковременном режиме двигатель за период работы не успевает нагреться до установившегося значения температуры, а за время перерыва в работе не охлаждается до температуры окружающей среды (рис. 11-3). Это двигатели кранов, лифтов, подъемников, экскаваторов и др. Для таких двигателей указывается относительная продолжительность включения (ПВ). Она равна отношению суммы рабочего времени

ко времени цикла t_{Σ} , состоящего из времени работы и времени паузы t_0 :

$$PB = \frac{t_1 + t_2 + \dots + t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n + t_0} 100\%. \quad (11-4)$$

Чем больше PB , тем меньше номинальная мощность двигателя при равных габаритах. Следовательно, двигатель, рассчитанный на работу в течение 25% времени цикла при номинальной мощности, нельзя оставлять под нагрузкой 60% времени цикла при той же мощности.

Электродвигатели строятся для стандартных $PB = 15, 25, 40, 60\%$, причем $PB = 25\%$ принимается за номинальную. Двигатель рассчитывается на повторно-кратковременный режим, если продолжительность цикла не превышает 10 мин. Расчет ведется по формуле (11-3), а затем для заданной PB находят номинальную мощность двигателя по каталогу крановых двигателей. Если найденная PB не соответствует стандартной, то подсчитанную по формуле (11-3) мощность $P_{\Sigma 1}$ пересчитывают на стандартную PB :

$$P_{\Sigma 2} = P_{\Sigma 1} \sqrt{\frac{(PB)_1}{(PB)_2}}. \quad (11-5)$$

11-6. Рубильники

Для ручного включения электрических машин и цепей постоянного и переменного тока при напряжениях до 500 В и токах до 1000 А применяются рубильники. На рис. 11-4, а и б показаны простой рубильник и его условное изображение на схемах. К стойкам 2, укрепленным на изолирующей плите 1, присоединяются провода 3. В нижних стойках шарнирно закреплены металлические ножи 4. На рис. 11-4, б показан трехполюсный рубильник, ножи которого, соединенные изолирующей траверсой 5, включаются одновременно. Рубильники могут быть одно-, двух- и многополюсными.

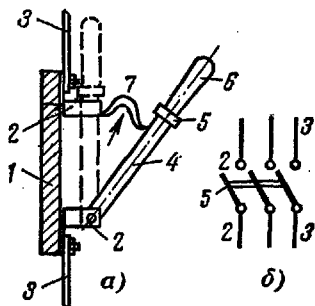


Рис. 11-4. Простой рубильник.

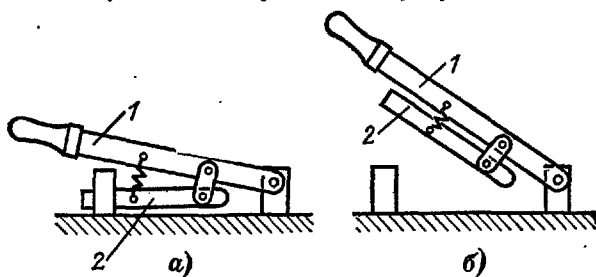


Рис. 11-5. Рубильник с мгновенным отключением.

При размыкании нагруженной цепи ручкой управления 6 между верхними стойками и ножами возникает электрическая дуга 7, оплавливающая контакты. Поэтому показанный рубильник применяется как разъединитель в цепях переменного тока при напряжении до 220 В, т. е. для отключения цепи без нагрузки.

Для отключения цепей под нагрузкой применяют рубильники с дугогасительными контактами (рис. 11-5). При отключении сначала отрываются рабочие ножи 1, а затем под влиянием натяжения пружин разрывные ножи 2. Размыкание происходит очень быстро, что способствует растягиванию и гашению дуги.

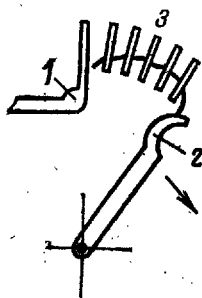


Рис. 11-6. Дугогасительная решетка.

В установках переменного тока 380 и 500 В и постоянного тока 220 В и выше для отключения цепей под нагрузкой выключатели снабжаются специальными дугогасительными устройствами. Одним из таких устройств является дугогасительная решетка (рис. 11-6). Над рабочими контактами 1 и 2 ставится решетка из стальных пластины 3, помещенная в камеру из асбестоцемента, керамики и др. Возникшая при размыкании дуга загоняется электродинамическими силами и тягой сильно нагретого воздуха вверх в решетку, где делится на отдельные дуги. Для горения каждой такой дуги требуется вполне определенное напряжение. Если разорвать дугу на такое число частей, при котором

напряжение между контактами 1 и 2 меньше суммы напряжений, необходимых для горения отдельных дуг, то все дуги быстро гаснут. Дугогасительные решетки и рубильники целиком при напряжениях 220, 380 и 500 В закрываются защитными кожухами.

11-7. Пакетные выключатели

Для уменьшения габаритов распределительных устройств при ручном включении и выключении электрических цепей постоянного и переменного тока напряжением 220 и 380 В и длительном токе от 10

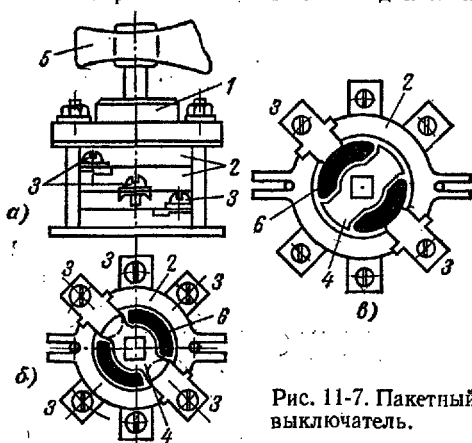


Рис. 11-7. Пакетный выключатель.

до 400 А применяются малогабаритные приборы — пакетные выключатели (рис. 11-7, а).

Провода сети присоединяются к неподвижным контактам 3, укрепленным на неподвижных шайбах 2 из изолирующего материала. При по-

вороте четырехгранного валика ручкой 5 расположенные на нем подвижные контакты 4 могут занимать два положения со сдвигом на 90° , показанные на рис. 11-7, б и в. Эти контакты двойные и при замыкании охватывают неподвижные контакты сверху и снизу. В положении 11-7, б неподвижные контакты замкнуты подвижными, а в положении 11-7, в они разомкнуты. Так происходит во всех трех шайбах 2, расположенных одна над другой.

В одной плоскости с подвижными контактами 4 находятся двойные фибровые шайбы 6, которые поворачиваются вместе с контактами. В положении, показанном на рис. 11-7, в, эти шайбы обхватывают неподвижные контакты 3 сверху и снизу. Фибровые шайбы служат для гашения электрической дуги, которая возникает при размыкании контактов, разлагает фибру с выделением водорода, углекислого газа и воды, что способствует гашению. Размыкание контактов при повороте ручки 5 происходит при помощи пружинного механизма под крышкой 1, уменьшающего время размыкания.

11-8. Реостаты для пуска и регулирования электродвигателей

О назначении реостатов и о схемах их включения говорилось в гл. 4 и 10. Реостаты служат для регулирования тока и собираются из стандартных элементов, представляющих собой сопротивления, закрепленные на изолирующем основании. Материалом сопротивлений служат константан, манганин, нихром, фехраль, стальная проволока и чугун. На рис. 11-8, а и б показаны элементы рамочного типа

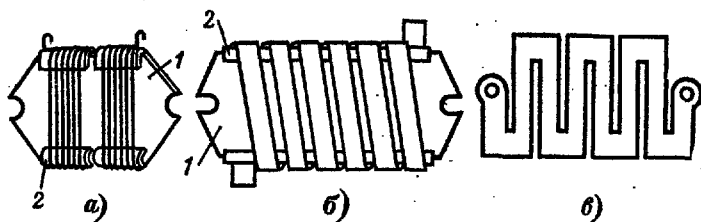


Рис. 11-8. Элементы сопротивлений.

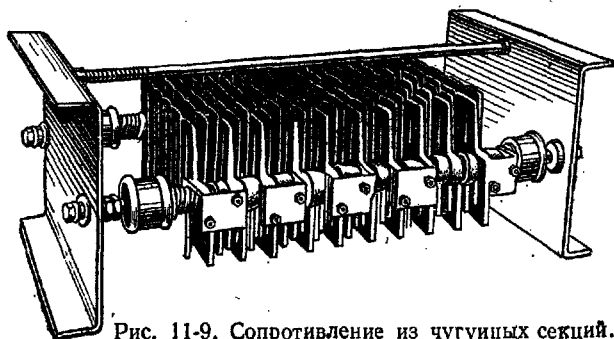


Рис. 11-9. Сопротивление из чугунных секций.

из проволоки и из ленты. Они намотаны на стальной пластине 1 и изолированы от нее фарфоровыми или стеатитовыми «наездниками» 2. На рис. 11-8, в изображен чугунный элемент сопротивления, из которых собираются ящики сопротивлений (рис. 11-9).

В отличие от ящиков сопротивлений реостаты имеют коммутирующее устройство для регулирования величины сопротивления (рис. 11-10).

При повороте рукоятки 2 на крышке 1 поворачиваются вал 3 и шесточное приспособление 4. Выводы от секций 6 располагаются по окружности на изолирующей плите 5. Под коробкой 7 расположены выводные зажимы реостата; вся конструкция сопротивлений для охлаждения помещается в бак с маслом.

Кроме металлических реостатов, получивших наибольшее распространение, существуют жидкостные реостаты, например для пуска асинхронных двигателей с кольцами. Жидкостный реостат представляет собой бак с электролитом (обычно вода с 8—10%-ным содержанием

соды), в которой погружаются изолированные друг от друга металлические пластины. Регулирование получается плавное, величина сопротивления реостата пропорциональна расстоянию между пластинами и обратно пропорциональна той поверхности пластин, которая погружена в раствор.

11-9. Контроллеры

Контроллерами называются аппараты, служащие для включений, выключений и переключений сопротивлений при пуске, регулировании и изменении направления вращения двигателей. Сам контроллер содержит переключающий механизм, а сопротивления в виде ящиков (рис. 11-9) устанавливаются отдельно. В отличие от многополюсного рубильника, контроллер замыкает и размыкает разные цепи не одновременно, а в установленной последовательности. На рис. 11-11, а показан вид сверху на один выключатель кулачкового типа контроллера.

На вертикальной раме 3 укреплен пластмассовый изолятор 2, несущий на себе неподвижный контакт выключателя 1, к которому проводом 12 подводится ток от кабельного наконечника переключаемой цепи 11. Основанием подвижного контакта 4 служит пластмассовый изолятор 5, который может поворачиваться на оси 6. Этот контакт присоединяется к кабельному наконечнику сети 14 проводом 13. Пружина 8 всегда стремится прижать подвижной контакт 4 к контакту 1. На вертикальном валу 10 против ролика 7 помещена кулачковая шайба 9, при помощи которой, поворачивая вал 10, можно замыкать и размыкать контакты 4 и 1. Такие выключатели (кулачковые элементы) распола-

гаются вдоль оси 10, а число их определяется схемой включения двигателя.

На схеме пуска асинхронного двигателя с кольцами (рис. 11-11, а) показано, что выключателей должно быть девять (I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX), а условное изображение их на схемах дано на рис. 11-11, в. На крышке контроллера, которая будет поставлена сверху, против ручки, поворачивающей вал 10, указываются позиции 1, 2, 3, 4, 5 вперед и назад. Замкнутым на схеме (11-11, в) следует

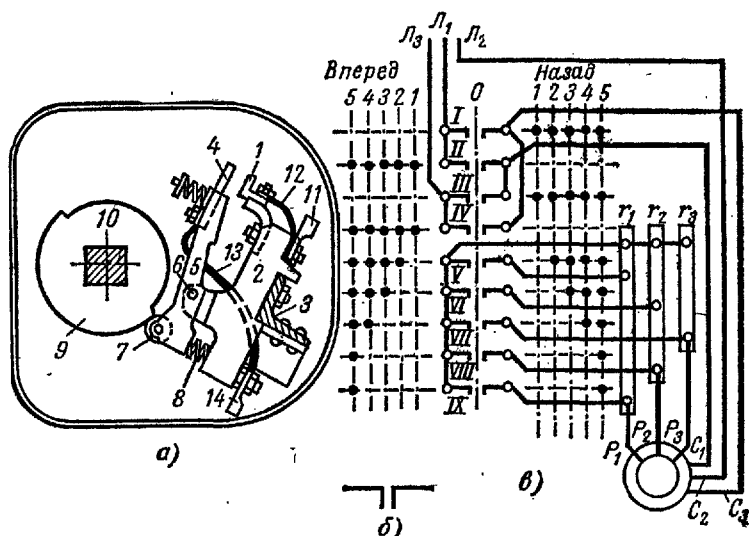


Рис. 11-11. Работа кулачкового контроллера.

считать тот выключатель, против которого стоит точка на соответствующей позиции.

В позиции 0 статор присоединен к сети зажимом C_2 , в ротор включены сопротивления r_1, r_2, r_3 , соединенные в звезду, и двигатель отключен. В позиции 1 вперед замыкаются выключатели II и IV, статор присоединяется к сети и двигатель начинает вращаться при полном сопротивлении в цепи ротора. При повороте ручки в позицию 2 замыкается выключатель V и часть сопротивления r_1 шунтируется. При дальнейшем повороте ручки в положения позиций 3, 4, 5 постепенно замыкаются выключатели, VI, VII, VIII и IX, чем шунтируются сопротивления во всех фазах ротора.

При поворачивании вала в обратную сторону (пуск назад) вместо выключателей II и IX срабатывают выключатели I и III, отчего меняются местами две фазы в цепи статора и двигатель вращается в обратном направлении. Переключения в цепи ротора производятся в той же последовательности.

11-10. Плавкие предохранители

Для защиты установок от токов короткого замыкания служат плавкие предохранители, в которых при коротком замыкании перегорает специальная вставка из меди, цинка, свинца или серебра. Свинец, его сплавы и цинк плавятся при низкой температуре ($200-240^{\circ}\text{C}$), что хорошо, но они имеют малую проводимость и вставки из них получаются большого сечения. Вставки из меди, имея хорошую проводимость, плавятся при высокой температуре ($1080-960^{\circ}\text{C}$). Серебряные вставки дороги и применяются при напряжениях более 1000 В и малых токах. Наиболее часто применяют посеребренные (для защиты от окисления) медные вставки, на которые напаивают «растворители» — свинцовые или оловянные шарики (см. ниже).

На рис. 11-12 показан внешний вид пробочного предохранителя и разрез его. На фарфоровое основание пробки надета тонкостенная

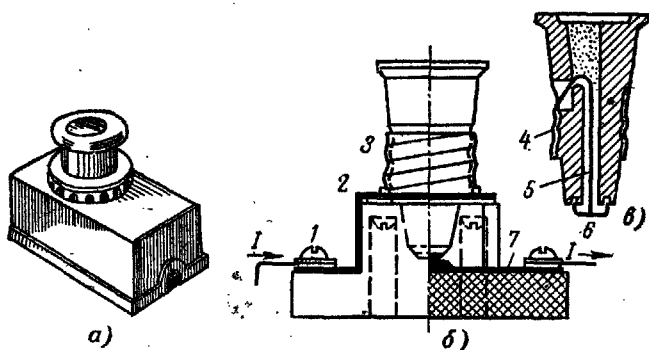


Рис. 11-12. Пробочный предохранитель.

металлическая муфта с резьбой 4 для ввинчивания пробки в резьбу 3 патрона предохранителя. От зажима 1 ток идет по пути — металлическая пластина 2, патрон 3, муфта с резьбой 4, плавкая вставка 5, контакт 6 к зажиму 7. Смена пробки (рис. 11-12, в) производится за фарфоровое основание без прикосновения человека к токоведущим частям. Пробочные предохранители применяются при напряжениях до 380 В и токах до 60 А.

Другой предохранитель трубчатого типа ПР-2 показан на рис. 11-13. На изолирующей плите 1 между контактными стойками 2 как нож рубильника вставлен предохранитель 3 в виде фибровой трубки. Эта трубка разборная, плотно закрытая латунными колпаками 4. Детали служат для крепления плавкой вставки 6 и как ножи для включения в стойки 2. При коротком замыкании плавкая вставка плавится одновременно в нескольких узких местах, что способствует быстрому гашению электрической дуги.

Под влиянием электрической дуги часть фибры переходит в газ, состоящий из водорода, углекислоты и водяных паров. Внутри трубки развивается давление до 10^7 Па (100 кгс/см^2) и дуга быстро гасится.

На рис. 11-14 показан предохранитель типа ПН-2, применяемый при напряжении до 500 В на токи 100—600 А с разборным патроном

наполненным кварцевым песком. В контактных стойках 2 изолирующей плиты 1 зажимаются ножи предохранителя 3. Плавкие вставки 7 из тонких медных лент, прикрепленные к ножам, находятся в кварцевом песке 6, заполняющем фарфоровую трубку 5 с крышками 4. На средней

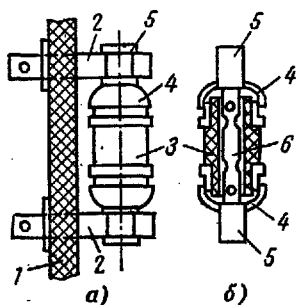


Рис. 11-13. Предохранитель трубчатого типа ПР-2.

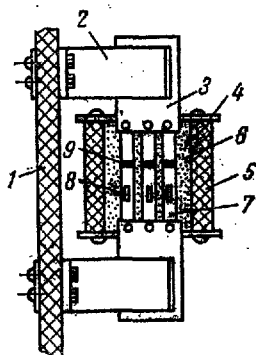


Рис. 11-14. Предохранитель типа ПН-2.

части вставок наплавлены перемычки 9 из олова. При перегрузках олово плавится, способствуя разрушению и перегоранию медной ленты. При коротких замыканиях ленты перегорают у перфораций 8. Для токов 15—60 А применяется предохранитель НПН с неразборным патроном, заполненным также кварцевым песком.

11-11. Автоматические воздушные выключатели

Автоматическими воздушными выключателями называются аппараты для ручного замыкания и автоматического или дистанционного размыкания силовых электрических цепей под нагрузкой. В установках переменного тока они устанавли-

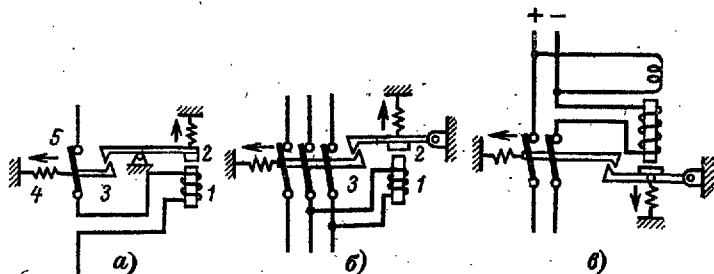


Рис. 11-15. Схемы включения расцепителей.

ваются при напряжениях до 500 В, а на постоянном токе — и при больших напряжениях, если выключения бывают не более нескольких раз в сутки. При автоматическом отключении срабатывает специальный расцепитель.

Расцепители представляют собой механизмы с подвижной системой (рис. 11-15, а—в), которая приводится в движение устройствами электромагнитного или теплового действия тока.

На рис. 11-15, а показан расцепитель максимального тока. При чрезмерном повышении тока нагрузки 1 электромагнит 1 притягивает якорь 2, освобождая защелку 3 и под влиянием пружины 4 рабочие контакты автомата 5 размыкаются. На рис. 11-15, б в расцепителе минимального напряжения при падении напряжения U электромагнит 1 опускает якорь 2, защелка 3 освобождается и рабочая цепь выключается. В расцепителе обратного направления энергии (рис. 11-15, в) защелка освобождается при изменении направления тока, когда суммарная м. д. с. катушек тока и напряжения изменится и рабочая цепь размыкается. Время $t_{отк.}$ в течение которого автомат отключает, составляет 0,05—0,025 с. Если автомат предназначен для отключения при снижении напряжения, то он срабатывает при $U = 0,4U_n$.

11-12. Контактторы

Контакторами называются аппараты, позволяющие включать электрическую цепь до 1 500 раз в час и применяющиеся в цепях постоянного и переменного тока с напряжением до 1 000 В. От коротких замыканий и перегрузок контакторы не защищают и поэтому должны работать совместно с устройствами защиты. Контактторы работают при напряжениях (0,85—1,03) U_n и автоматически выключают установку при уменьшении напряжения до (0,5—0,6) U_n .

Трехполюсный контактор переменного тока (рис. 11-16) изготавливается на токи 20—600 А; время его срабатывания лежит в пределах 0,05—0,1 с.

При нажатии кнопки П (пуск) в цепи управления появляется ток в обмотке электромагнита 8, якорь 3 притягивается к сердечнику 7 и изолированный квадратный валик 1 поворачивается в подшипниках, не показанных на схеме. Подвижные контакты 2 и неподвижные 6 в рабочей цепи замыкаются и двигатель 9 начинает вращаться.

Рис. 11-16. Схема работы контактора.

Одновременно мостик 4 поворачивается, размыкая нижние блок-контакты 5 и замыкая верхние; кнопка П может быть отпущена. По принципу действия верхние блок-контакты называются замыкающими, а нижние — размыкающими. При нажатии кнопки СТ (стоп) ток в катушке 8 исчезает и рабочие контакты 2 и 6 размыкаются. Рабочие контакты помещаются в специальных дугогасительных камерах. В контакторах переменного тока магнитный поток в катушке 8 периодически переходит через нуль. Это вызывает вибрации и гудение конструкции. Для устранения этого явления на торец сердечника катушки

надевают короткозамкнутый виток, в котором, как во вторичной обмотке трансформатора, вызывается ток, сдвинутый по фазе относительно тока в катушке 8. В моменты перехода главного потока через нуль поток короткозамкнутого витка препятствует отпадению якоря.

11-13. Реле

Все рассмотренные выше виды аппаратов относятся к силовым аппаратам рабочих цепей, коммутирующим токи более 5—10 А. Р е л е — это аппараты на меньшие токи, работающие не в рабочих цепях, а в цепях управления при невысоких напряжениях. Их контакты управления просты, а дугогасительные устройства отсутствуют. Реле — это такой элемент цепи управления постоянного или переменного тока, который при достижении определенного значения управляемой величины (тока, напряжения и др.) срабатывает мгновенно или с выдержкой времени. Наименьший ток, при котором происходит замыкание (или размыкание) контактов реле, называется током срабатывания. Наибольший ток,

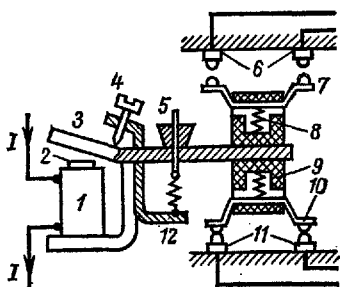


Рис. 11-17. Схема работы электромагнитного токового реле.

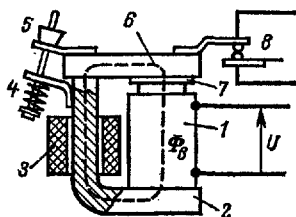


Рис. 11-18. Схема работы реле времени.

при котором контакты реле возвращаются в исходное положение называется током отпускания.

На рис. 11-17 показана схема работы электромагнитного токового реле. Когда ток I силовой установки, проходящий по катушке 1 достигает величины тока срабатывания, якорь электромагнита 3 притягивается к полюсному наконечнику 2. При этом контакты 6 и 7 замыкаются, а 10 и 11 размыкаются. Подвижные контакты 7 и 10 установлены на рычаге 3 при помощи пластмассовых колодок 9 и пружин 8. Ток срабатывания регулируется натяжением возвратной пружины 12 с помощью гайки 5 и изменением воздушного зазора электромагнита при помощи гайки 4.

Реле времени с электромагнитным замедлением схематически показано на рис. 11-18. Это реле срабатывает не мгновенно, а спустя сравнительно большое время (до 5 с) после исчезновения напряжения на зажимах его обмотки 1. Реле показано во включенном состоянии, предшествующем размыканию контактов 8 вспомогательной цепи. Работает оно следующим образом.

На магнитопровод 2 надета короткозамкнутая гильза 3, в которой при уменьшении потока возбуждения Φ_v (размыкание магнитопровода при срабатывании) возникают согласно закону Ленца ток и поток Φ_d ,

складывающийся с Φ_v . Поэтому при снятии напряжения U якорь 6 не сразу отрывается от сердечника катушки 1. Чем больше сила пружины 4, регулируемая гайкой 5, тем при большем потоке Φ_v произойдет срабатывание и, следовательно, тем меньше время отпускания реле. Это время можно также регулировать изменением толщины латуинной прокладки 7.

На рис. 11-19 показана схема теплового реле защиты. По нагревательному элементу 2 проходит рабочий ток I , или доля его

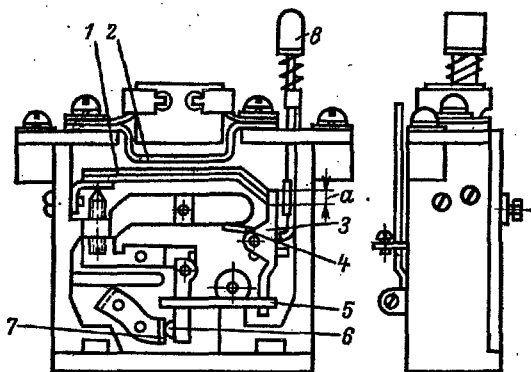


Рис. 11-19. Схема работы теплового реле.

в зависимости от устройства, и нагревает биметаллическую пластинку 1. Она представляет собой двухслойный элемент из металлов с разными температурными коэффициентами линейного расширения. В результате нагрева пластинка деформируется, ее правый конец, выпрямляясь, освобождает рычажок 3, который, поворачиваясь, усилием пружины 4 при помощи тяги 5 размыкает контакты 6, 7, включенные в цепь втягивающей катушки магнитного пускателя (§ 11-14). Возврат контактов (в замкнутое положение) после остывания биметаллической пластины производится вручную при помощи кнопки 8.

11-14. Схема управления асинхронным двигателем с помощью реверсивного магнитного пускателя

Для удобства чтения приведенных ниже схем на рис. 11-20 показаны условные изображения некоторых элементов схем. Коммутирующие устройства на схемах изображаются в отключенном положении, т. е. при отсутствии тока во всех цепях схемы или действия внешних принудительных сил на подвижные части контактов.

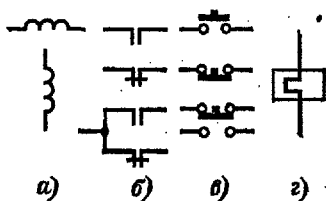
Контакты, служащие для управления трехфазными асинхронными двигателями, называются магнитными пускателями. Элементарная (развернутая) схема реверсивного магнитного пускателя показана на рис. 11-21. На развернутой схеме элементы силовой части цепи показаны отдельно от элементов цепи управления, что позволяет наглядно проследить прохождение тока в обеих цепях. Защита двига-

теля от токов короткого замыкания осуществляется плавкими предохранителями, а от перегрузок — двумя тепловыми реле. Пускатель содержит два контактора для хода «вперед» (*В*) и «назад» (*Н*).

Статор двигателя присоединяется к сети через предохранители, замыкающие рабочие контакты контакторов вперед (*В*) или назад (*Н*), и нагревательные элементы *1РТ* и *2РТ* тепловых реле.

Рис. 11-20. Некоторые условные обозначения в схемах.

а — обмотки реле, контакторов, магнитных пускателей; *б* — контакты реле, контроллера, пускателя, блок-контакты: замыкающий, размыкающий, переключающий; *в* — кнопки с самовозвратом: замыкающая, размыкающая, переключающая; *г* — нагревающий элемент теплового реле.



Работа в цепи управления при пуске происходит следующим образом. При нажатии кнопки *В* сначала размыкаются контакты 1 и 2, а затем замыкаются контакты 3 и 4. Ток идет от зажима сети *Л*₁, через размыкающую кнопку *СТ*, размыкающую кнопку *Н*, замыкающую кнопку *В*, катушку контактора *В*, контакты тепловых реле *1РТ* и *2РТ* и к зажиму сети *Л*₃. Якорь контактора *В* притягивается и замыкающие контакты *В* главной цепи срабатывают, подключая статор

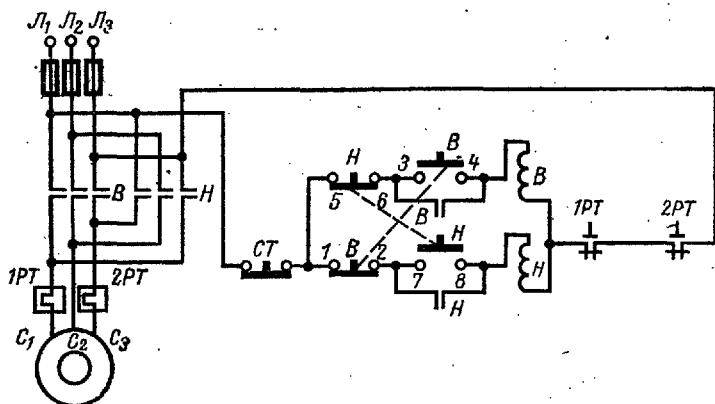


Рис. 11-21. Элементная схема реверсивного магнитного пускателя.

к сети. В это же время замыкающий блок-контакт контактора *В* замыкается, шунтируя кнопку *В*, которую можно отпустить. Остановка двигателя производится нажатием размыкающей кнопки *Ст*. При этом ток в обмотке контактора *В* исчезает, якорь его отпадает, размыкая главные контакты *В* и блокировочные *В* у кнопки *В*.

Таким же образом пускается двигатель в обратную сторону нажатием кнопки *Н*, причем сначала размыкаются контакты 5 и 6, а затем замыкаются контакты 7 и 8. Размыкающие контакты пусковых

кнопок *В* и *Н* служат для их взаимной блокировки; они не позволяют подать питание на катушки контакторов одновременно. В случае одновременного срабатывания обоих контакторов возникает короткое замыкание питающей сети.

11-15. Схема включения двухскоростного асинхронного двигателя

На рис. 11-22 показана схема управления пуском двухскоростного асинхронного двигателя. Для получения меньшей скорости, когда число полюсов удвоено, нажимают кнопку *Пуск М* и обмотки

статора присоединяются к сети зажимами *С*₄, *С*₅, *С*₆, т. е. в треугольник. При этом включении обмотка статора создает большее число полюсов. Большая скорость получается при нажатии кнопки *Пуск Б*, когда включаются контакторы *1Б* и *2Б* и обмотки статора соединяются при параллельном соединении секций двойной звездой. При этом включении обмотка статора создает меньшее число полюсов. Переключение на большую скорость можно производить без предварительного нажатия кнопки *Стоп*, т. е. на ходу.

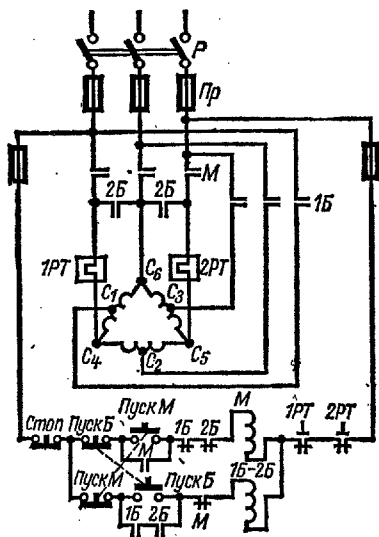


Рис. 11-22. Схема пуска двухскоростного асинхронного двигателя.

11-16. Автоматический пуск асинхронного двигателя с кольцами

Схема автоматического пуска асинхронного двигателя с кольцами показана на рис. 11-23. Статор присоединяется к сети через линейный контактор *ЛК*, а к ротору подключены три симметричные сопротивления $r_1 + r_2$, соединенные в звезду. Пуск производится при помощи контакторов ускорения *1У* и *2У*, токовых реле ускорения *РТ*₁ и *РТ*₂ и реле времени *РВ*.

При нажатии кнопки *П* (пуск) катушка *ЛК* оказывается под напряжением, главные контакты *ЛК* и его блок-контакты *БК* замыкаются. К статору подано напряжение, и кнопку *П* можно отпустить. Ротор начинает вращаться, а его фазный ток проходит через наибольшее сопротивление $r_1 + r_2$ и обмотки реле *РТ*₁ и *РТ*₂. Эти реле срабатывают при заданной величине тока, превышающей ток трогания, и отпускают,

приходя в исходное положение, при токах, меньших тока отпущания (возврата). Одновременно с подачей питания в обмотку статора включается обмотка реле времени.

Под действием тока ротора реле PT_1 и PT_2 размыкают свои (замкнутые) контакты PT_1 и PT_2 . Через некоторое установленное время после размыкания контактов PT_1 и PT_2 реле времени PB замыкает свои контакты PB . Когда ток в роторе, уменьшаясь, достигает величины

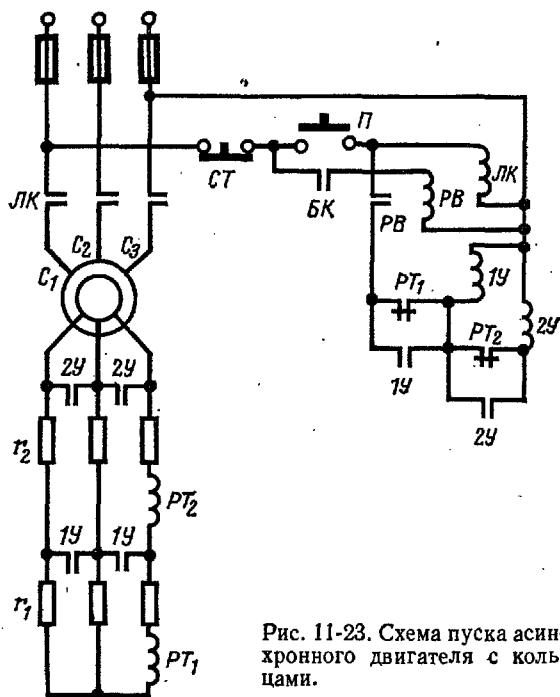


Рис. 11-23. Схема пуска асинхронного двигателя с кольцами.

тока возврата реле PT_1 , оно замыкает свои контакты PT_1 , ток поступает в катушку реле $1Y$, оно срабатывает и замыкает свои рабочие контакты $1Y$, шунтируя сопротивление r_1 . При этом ток в роторе броском увеличивается. Одновременно замыкаются блок-контакты $1Y$ в цепи управления.

Когда при увеличении скорости ток в роторе снова уменьшится до величины тока отпущания реле PT_2 , оно отпустит и замкнет свои контакты PT_2 . Катушка контактора $2Y$ будет под напряжением и рабочие контакты контактора $2Y$ шунтируют вторую часть сопротивления r_2 в цепи ротора. Блок-контакты $2Y$ также замкнутся.

Таким образом, будет обеспечен плавный разгон двигателя.

11-17. Автоматический пуск двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением

На рис. 11-24 показана схема автоматического пуска двигателя постоянного тока параллельного возбуждения. Действие схемы заключается в том, что два последовательно включенных с якорем сопротивлений r_1 и r_2 , по мере разбега якоря постепенно шунтируются. При включении рубильника сети подается полное напряжение на обмотку возбуждения двигателя, шунтированную разрядным сопротивлением $r_p \approx (4 \div 5) r_v$ для предохранения изоляции обмотки

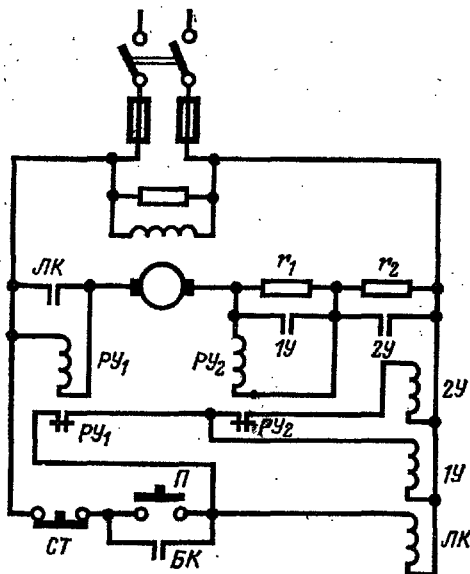


Рис. 11-24. Схема пуска двигателя параллельного возбуждения.

от пробоя при случайном обрыве цепи возбуждения. Ток, проходящий в это время через обмотку реле управления $РУ_1$, якорь и сопротивления $r_1 + r_2$, так мал, что якорь остается неподвижным. Однако под влиянием этого тока реле $РУ_1$ срабатывает и замкнутые контакты его размыкаются. Реле управления $РУ_2$ свои контакты разомкнуть не может, так как падение напряжения на сопротивлении r_1 ничтожно. Оба эти реле представляют собой реле времени.

При нажатии кнопки Π (пуск) ток устанавливается в обмотке линейного контактора $ЛК$ и рабочие контакты контактора $ЛК$ замыкаются. Блок-контакты $БК$ также замыкаются, и кнопка Π может быть отпущена.

Пусковой ток I_n , проходящий через якорь и сопротивления $r_1 + r_2$, заставляет якорь вращаться. Падение напряжения $I_n r_1$ становится достаточным, чтобы реле $РУ_2$ разомкнуло свои замкнутые контакты $РУ_2$. Обмотка реле $РУ_1$ оказывается шунтированной контактами контактора $ЛК$, и через некоторое, заранее установленное время ток в обмотке настолько уменьшится, что его контакты $РУ_1$ замкнутся. Тогда через

обмотку контактора ускорения $IУ$ пойдет ток, его контакты $IУ$ замкнутся, шунтируя сопротивление r_1 .

Ток в якоре снова возрастет до величины I_n , но так как $I r_1 \approx 0$, то обмотка реле $РУ_2$ не сможет удерживать контакты $РУ_2$ разомкнутыми и через некоторое время они замкнутся. Тогда ток станет проходить через обмотку контактора ускорения $2У$ и контакты его $2У$ замкнутся, шунтируя сопротивление r_2 . Этим пуск заканчивается. Для остановки двигателя следует нажать кнопку $СТ$ (стоп).

11-18. Лабораторная работа. Сборка и проверка работы схемы релейно-контакторного управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором

П л а н р а б о т ы

1. Ознакомиться с двигателем и пусковой аппаратурой и записать их паспортные данные.
2. Пользуясь рис. 11-21, собрать схему для пуска двигателя только «вперед» и показать ее руководителю.
3. Пустить двигатель нажатием кнопки $В$. Остановить двигатель нажатием кнопки $СТ$.
4. Собрать схему двигателя для пуска «назад» и произвести пуск аналогично п. 3.
5. Собрать схему двигателя для пуска «вперед» и «назад» и показать ее руководителю.
6. Пустить двигатель, нажимая кнопку $В$; остановить двигатель, нажимая кнопку $СТ$. Пустить двигатель в обратную сторону и остановить его.
7. Попробовать пустить двигатель, нажимая одновременно кнопку $В$ и кнопку $Н$, и объяснить причину того, что при этом происходит.
8. Сделать заключение о проделанной работе.

Глава двенадцатая

Передача и распределение электрической энергии

12-1. Схемы электроснабжения промышленных предприятий.

Промышленные предприятия в большинстве случаев получают электрическую энергию от энергосистемы¹.

В зависимости от мощности предприятия и ряда условий электрическая энергия подается потребителю под напряжением 110; 35; 6 или 0,4/0,23 кВ.

При значительном удалении промышленного предприятия от электростанции или подстанции энергосистемы напряжение подается на по-

¹ Энергосистемой называется объединение государственных электрических станций, связанных между собой высоковольтными линиями электропередачи.

нижающую подстанцию предприятия, где оно и трансформируется с 35—110 кВ до 6—10 кВ (рис. 12-1). При этом напряжении электрическая энергия обычно по кабельным линиям передается по территории предприятия к цеховым подстанциям. К распределительным устройствам (РУ) подстанций 6—10 кВ присоединяются кабельные линии для питания высоковольтных электродвигателей и трансформаторы, понижающие напряжение до 0,4—0,23 кВ. От трансформаторов цеховых подстанций по внутренним сетям энергия распределяется между электроприемниками цеха, работающими при номинальном напряжении 380 или 220 В (электродвигатели, освещение и др.).

При электроснабжении предприятия на напряжении 6—10 кВ энергия поступает на главный распределительный пункт (ГРП) предприятия.

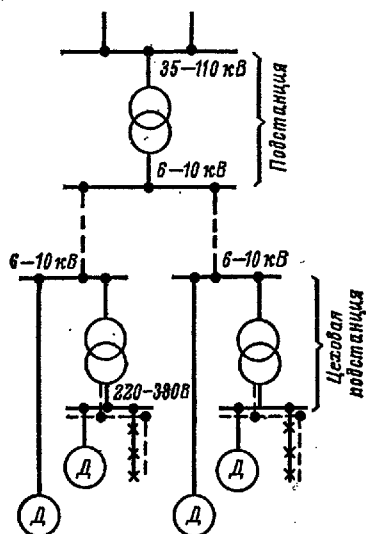


Рис. 12-1. Схема распределения энергии крупного промышленного предприятия.

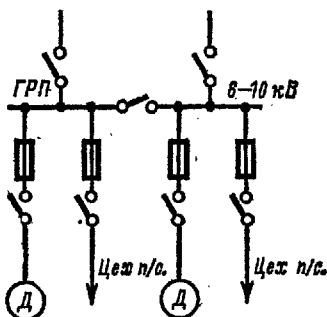


Рис. 12-2. Схема распределения электроэнергии через распределительный пункт предприятия.

тия (рис. 12-2). Энергия к ГРП подводится по одной-двум кабельным (реже воздушным) линиям, а число отходящих от него линий того же напряжения, по которым энергия подается к цеховым трансформаторным подстанциям, обычно значительно больше.

Небольшие предприятия, не имеющие высоковольтных приемников энергии, получают электроэнергию от понижающих подстанций энергосистемы при напряжении 6—10 кВ непосредственно на заводскую трансформаторную подстанцию, от которой пониженное напряжение 0,4—0,23 кВ передается к цеховым распределительным пунктам (РП).

На мелкие предприятия с малой установленной мощностью энергия из энергосистемы поступает при напряжении 0,4/0,23 кВ на низковольтный распределительный пункт предприятия, откуда и распределяется по отдельным цехам¹.

¹ На зажимах трехфазных понижающих трансформаторов должно быть номинальное напряжение 0,4—0,23 кВ, с тем чтобы с учетом допустимой потери напряжения в распределительной электросети у зажимов электроприемников было номинальное напряжение 0,38—0,22 кВ.

Распределение энергии в промышленных предприятиях между ГРП или трансформаторной подстанцией и цеховыми распределительными пунктами производится по радиальной (рис. 12-3) или магистральной (рис. 12-4) схеме (рис. 12-4).

К недостаткам радиальной схемы относятся высокая стоимость и меньшая надежность работы, так как при аварии радиальной линии

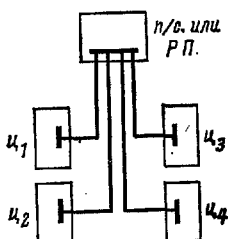


Рис. 12-3. Радиальная схема распределения электроэнергии по цехам.

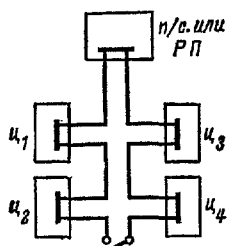


Рис. 12-4. Магистральная схема распределения электроэнергии по цехам.

прекращается подача электроэнергии по этой линии. Из достоинств следует отметить простоту эксплуатации, защиты и автоматизации.

Достоинством магистральной схемы является дешевизна и большая надежность снабжения электроэнергией, если магистраль замкнута в кольцо (рис. 12-4). Если магистраль разомкнута, то надежность электроснабжения невелика.

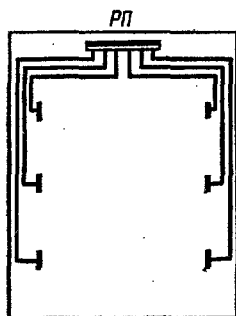


Рис. 12-5. Радиальная схема.

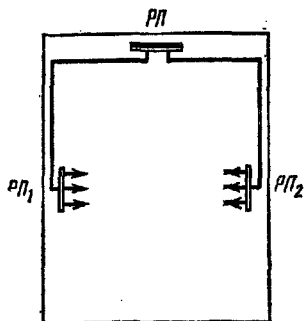


Рис. 12-6. Радиально-ступенчатая схема.

На предприятиях с ответственными нагрузками с целью повышения надежности электроснабжения обычно применяют магистральные схемы с питанием их с двух сторон от разных трансформаторов (подстанций).

Для уменьшения колебаний напряжения на светильниках, вызванных большими пусковыми токами асинхронных двигателей, в ряде

случаев применяют разделение линии и сетей на осветительные и силовые.

При номинальном напряжении в установке 380/220 В двигатели присоединяются к линейным проводам (380 В), а осветительные приборы включаются между нейтральным (нулевым) проводом и линейными проводами (220 В).

Внутри цеха при небольшом числе мощных двигателей применяется радиальная схема питания (рис. 12-5). По другому варианту от цехового РП идут линии к участковым РП, к которым присоединяются линии для питания отдельных приемников (рис. 12-6).

Широкое применение в цехах получила простая и дешевая магистральная схема, использующая стальные голые шины — шинопровод, вдоль которого в нужных местах присоединяются приемники энергии.

12-2. Трансформаторные подстанции и распределительные устройства промышленных предприятий

Распределительные устройства (РУ) и трансформаторные подстанции (ТП) напряжением 35—110 кВ выполняются, как правило, открытыми, все электрооборудование их размещается на открытом воздухе. Только при наличии в воздухе веществ, вредно действующих на электрооборудование, РУ и подстанции на указанные напряжения выполняются закрытыми, т. е. размещаются в зданиях. Открытые устройства дешевле закрытых, скорее сооружаются и требуют меньше строительных материалов.

Широкое применение получили комплектные распределительные устройства (КРУ) и комплектные трансформаторные подстанции (КТП).

Комплектными называются распределительные устройства и трансформаторные подстанции, состоящие из отдельных металлических шкафов с смонтированным в них электрооборудованием. Изготовление шкафов и монтаж оборудования в них производится на заводах. Шкафы выпускаются определенной номенклатуры. Оборудование и схемы их выбраны так, чтобы из нескольких шкафов можно было собрать распределительное устройство или подстанцию. Применение КРУ и КТП ускоряет и удешевляет сооружение электроустановки.

На рис. 12-7 показано схематически устройство открытой трансформаторной подстанции промышленного предприятия напряжением 35/6—10 кВ.

Трансформатор, например, мощностью 3 200 кВ·А через плавкие предохранители и разъединители присоединен к воздушной линии 35 кВ. Для защиты от перенапряжений применен вентильный разрядник ВР. Вторичная обмотка трансформатора соединена с шинами комплектного распределительного устройства для наружной установки КРУН.

Схема и разрез одного из шкафов КРУ дана на рис. 12-8. С шин 1 ток идет через шинный разъединитель 2, масляный выключатель 3, трансформатор тока 4, линейный разъединитель 5 к кабельному или воздушному выводу и далее по линии на шины цеховой подстанции.

Главный распределительный пункт предприятия, на который электрическая энергия поступает от энергосистемы при напряжении 6—10 кВ, размещается обычно в одноэтажном здании и оборудуется или шкафами КРУ, или камерами сборной конструкции.

Устройство одной ячейки ГРП сборной конструкции показано на рис. 12-9, где одноименная аппаратура обозначена теми же цифрами,

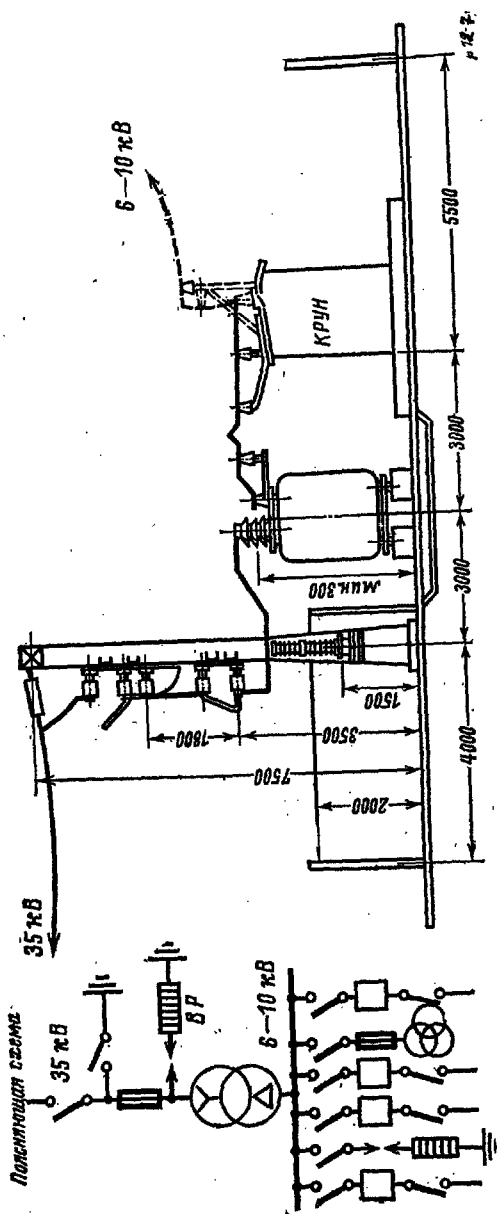


Рис. 12-7. Трансформаторная подстанция открытого типа 35/6—10 кВ.

что и на предыдущем рисунке. Главный распределительный пункт имеет однорядное расположение камер и коридор управления.

Цеховые подстанции промышленных предприятий, так же как и ГРП, оборудуются или камерами сборной конструкции, или шкафами КТП.

Устройство одной из цеховых подстанций показано на рис. 12-10. Трансформатор напряжением 6/0,4—0,23 кВ и распределительный щит расположены в смежных помещениях.

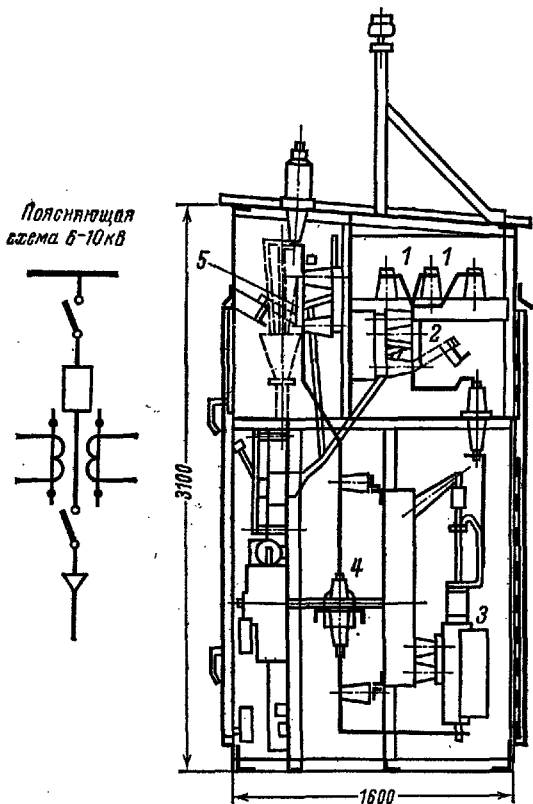


Рис. 12-8. Шкаф КРУ с масляным выключателем и кабельным или воздушным выводом.

Проемы в нижней части камеры (на рисунке не показаны) и вытяжная шахта в верхней обеспечивают охлаждение трансформатора. Энергия к трансформатору подводится через кабель 1, разъединитель 2 с рычажным приводом 3. Вторичные выводы трансформатора через разъединитель 4 с рычажным приводом 5 соединены с шинами распределительного щита. К шинам щита присоединены кабельные линии для питания освещения и шинопровод для питания электродвигателей.

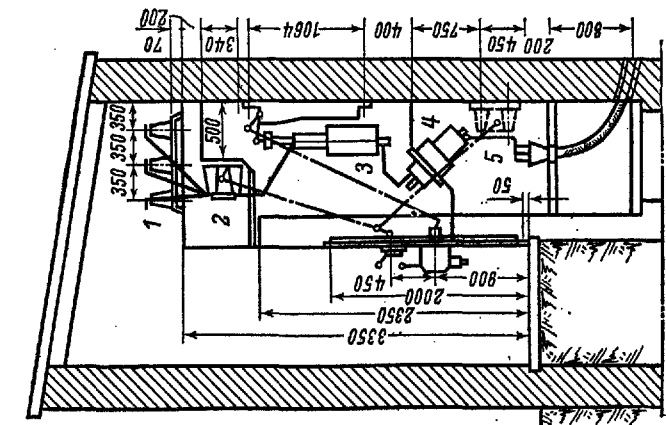


Рис. 12-9. Распределительное устройство
6—10 кВ.

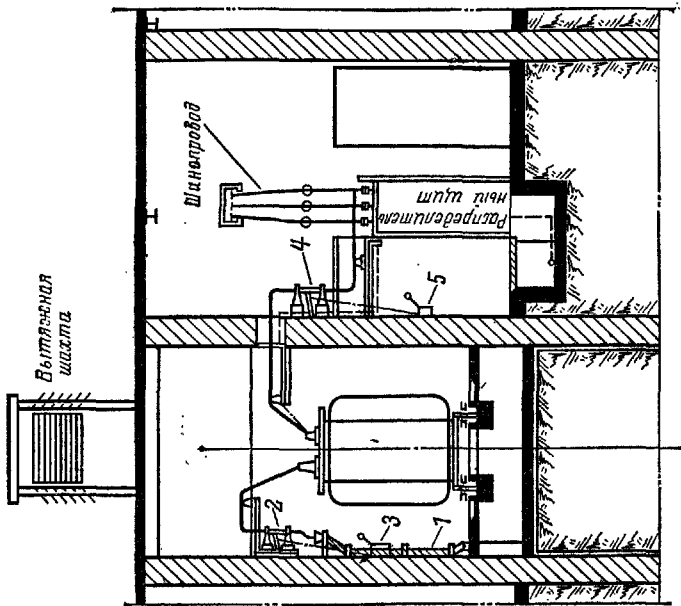


Рис. 12-10. Цеховая трансформаторная подстанция.

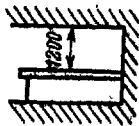


Рис. 12-11. Схема установки щита низкого напряжения с односторонним обслуживанием.

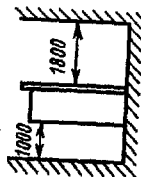


Рис. 12-12. Схема установки щита низкого напряжения с двусторонним обслуживанием.

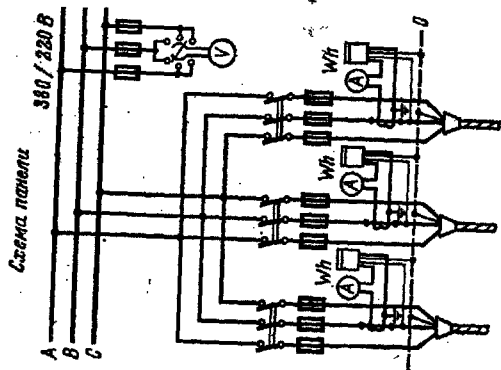
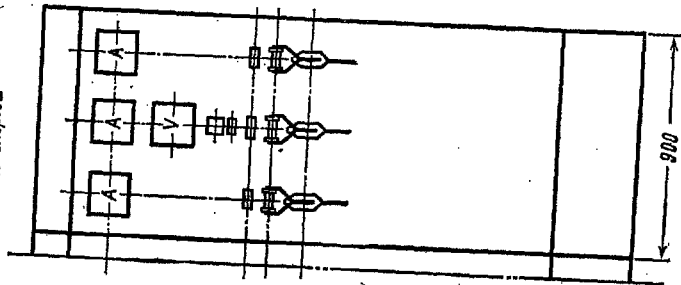


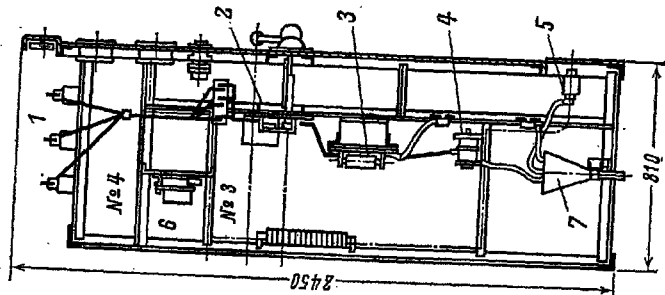
Рис. 12-13. Панель щита с двусторонним обслуживанием напряжением 380/220 В завода «Электрощит» и ее схема.

а — схема, б — разрез; 1 — сборные шины; 2 — рубильник; 3 — плавкий предохранитель; 4 — трансформатор тока; б — нулевая шина; 6 — счетчик; 7 — кабельная воронка.

Вид сверху



Разрез



б)

В каждой линии имеется предохранитель и рубильник, а в цепи шинопровода — *воздушный автоматический выключатель*. Шинопровод через отверстие в стене проходит в соседнее производственное помещение.

Распределительные щиты низкого напряжения цеховых подстанций изготавливаются с односторонним или двусторонним обслуживанием (рис. 12-11 и 12-12), каркасной или бескаркасной конструкции. В щитах каркасной конструкции применяются панели из листовой стали или листов изоляционного материала, например асбестоцемента. В бескаркасных щитах применяются панели только из листовой стали.

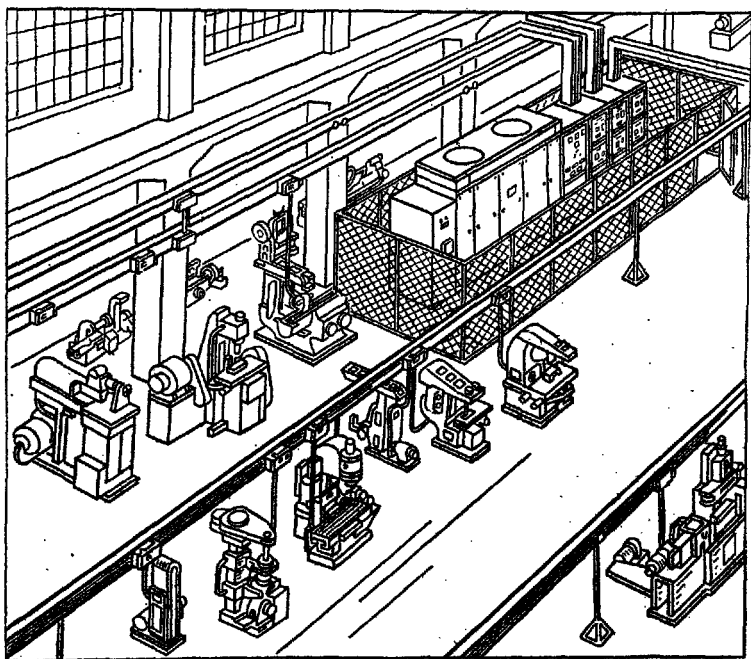


Рис. 12-14. Цеховая подстанция с шкафами КТП и шинопроводами.

Щит каркасного типа с двусторонним обслуживанием и схема одной из панелей показаны на рис. 12-13.

Цеховая подстанция с шкафами КТП и шинопроводами показана на рис. 12-14.

С целью удешевления применяется упрощенная схема цеховой подстанции в сочетании с шинопроводом, получившая название «блок трансформатор—магистраль» (рис. 12-15). В этой установке отсутствует распределительный щит. Ток от трансформатора через автомат А поступает непосредственно в шинопровод, а от него — к отдельным электродвигателям.

Для питания небольших групп некрупных электроприемников в цехах устанавливаются распределительные пункты. На рис. 12-16

показан блочно-распределительный пункт типа ПРБ-59, собранный из отдельных блоков. В нем каждая отходящая линия выключается и отключается независимо от других, а смена предохранителей производится при отсутствии напряжения.

Питание электроприемников осуществляется через *групповые распределительные пункты*. Они представляют собой шкафы или ящики с вмонтированными в них рубильниками или выключателями и плавкими предохранителями (рис. 12-17).

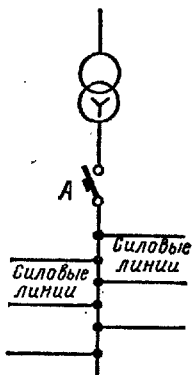


Рис. 12-15. Схема блока трансформатор — магистраль.

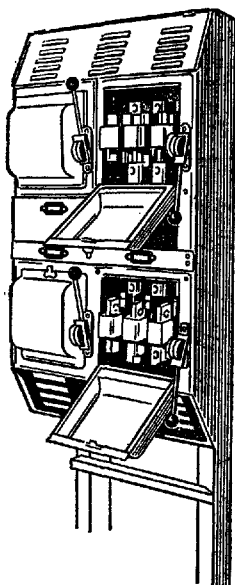


Рис. 12-16. Пункт распределительный блочный типа ПРБ-59 с четырьмя блоками.

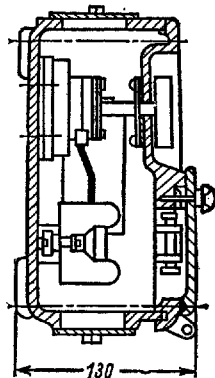
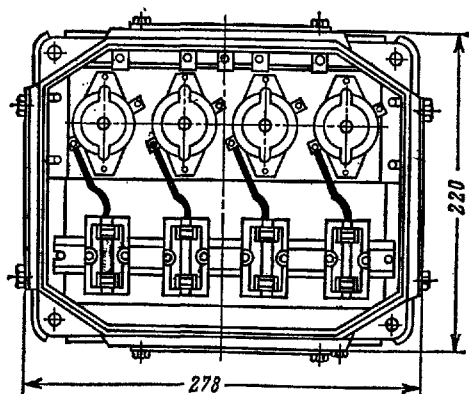


Рис. 12-17. Осветительный пункт.

12-3. Электрические сети промышленных предприятий

а) Воздушные и кабельные сети

Электрическая энергия передается по системе проводов электрической линии, если система проводов не имеет разветвлений, или электрической сети, если она разветвленная.

Согласно правилам устройства электроустановок (ПУЭ) линии и сети подразделяются по напряжению на линии и сети напряжением до 1 000 В и линии и сети напряжением выше 1 000 В.

По своему назначению линии и сети делятся на питающие, предназначенные для передачи энергии от стан-

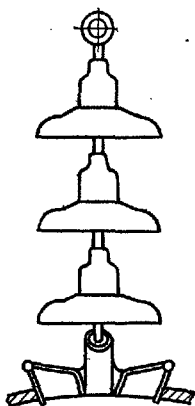


Рис. 12-18. Гирлянда подвесных изоляторов.

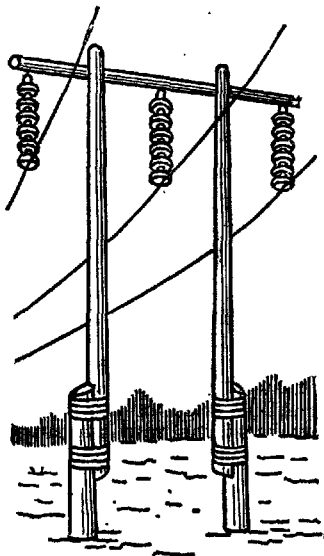


Рис. 12-19. Деревянная опора для трехфазной высоковольтной линии.

ции или подстанции к важнейшим узловым точкам сети — распределительным пунктам (РП), и распределительные сети, по которым электроэнергия от РП передается к электроприемникам.

По своему устройству сети делятся на воздушные, кабельные (подземные) и сети внутренней проводки.

Сооружение воздушных линий дешевле, чем подземных, эксплуатация их удобнее и проще, так как повреждения легко обнаруживаются при осмотре, но они более опасны и менее надежны, чем подземные линии. Воздушные линии прокладываются преимущественно в открытых местностях и в местах с малой плотностью населения.

Воздушная линия состоит из проводов, изоляторов и опор. Провода крепятся на изоляторах, установленных на опорах.

Воздушные линии (ВЛ) напряжением 35 кВ и выше имеют голые алюминиевые или сталеалюминиевые провода, гирлянды подвесных изоляторов (рис. 12-18) и металлические, железобетонные или дере-

вяные опоры (рис. 12-19). Расстояние между проводами ВЛ должно быть достаточно большим для того, чтобы даже при раскачивании их ветром была исключена возможность пробоя воздушного промежутка между ними.

Для линий напряжением 35 кВ и ниже часто применяют штыревые изоляторы (рис. 12-20).

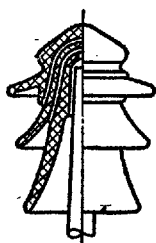


Рис. 12-20. Штыревой изолятор на напряжение 35 кВ.

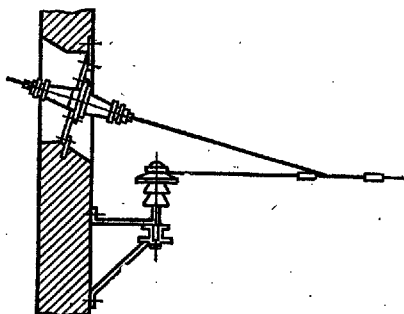
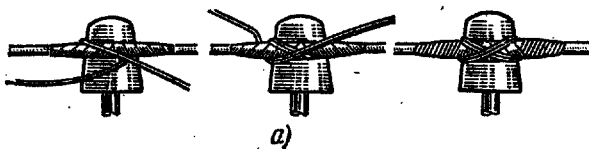


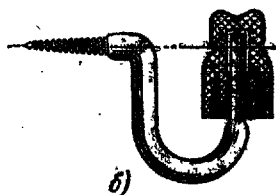
Рис. 12-21. Ввод линии в здание.

На рис. 12-21 показан ввод ВЛ в здание с применением проходного фарфорового изолятора.

Для воздушных линий напряжением до 1 000 В применяют преимущественно алюминиевые провода или сталеалюминиевые (например, марки АС-16, имеющий шесть алюминиевых проволок диаметром 1,8 мм и одну стальную того же диаметра).



а)



б)

Рис. 12-22. Крепление провода на низковольтном фарфоровом изоляторе (а) и крепление изолятора на крюке (б).

Провода монтируются на низковольтных фарфоровых изоляторах (тип ТФ, рис. 12-22), которые наворачиваются на штыревую часть крюка или штыря, при помощи которого изоляторы крепятся к опорам. По условиям механической прочности сечение алюминиевых проводов должно быть не менее 16 мм². Провода закрепляются на шейке изолятора (реже

на головке) при помощи «вязки» из мягкой стальной оцинкованной проволоки диаметром около 1 мм.

Для линий напряжением до 1 000 В применяются деревянные или железобетонные опоры — столбы длиной около 9 м. У деревянных опор нижняя часть столба — нога может быть несоставной или составной. В последнем случае нижний конец опоры присоединяется к железобетонному или реже к деревянному «стулу» или «пасынку» (рис. 12-23). Соединение ноги с пасынком выполняется при помощи банджа, состоящего из 6—8 витков оцинкованной стальной проволоки диаметром около 4 мм. Расстояние между опорами составляет 30—80 м. Расстояние провода от земли должно быть не менее 5 м, расстояние между проводами не менее 20 см по горизонтали и не менее 40 см по вертикали.

Подземные линии применяются в городах и на территориях промышленных предприятий. Для подземных линий применяются кабели. Кабели состоят из токоведущих жил, изоляции, герметической оболочки и наружного защитного покрова. По числу жил кабели изготавливаются одно-, двух-, трех- и четырехжильными. Жилы кабеля выполняются из меди или алюминия и имеют круглое или секторообразное сечение. Кабели изготавливаются с сечением жил от 1 до 240 мм² (1; 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25 и т. д.) для напряжений до 1 000 В и выше 1 000 В до 35 кВ.

Изоляционным материалом токоведущих жил является кабельная бумага, пропитанная маслом-капильным составом, резина или полиэтилен. Герметическая оболочка из свинца, алюминия, пластика или резины предназначена для защиты кабеля от проникновения влаги. Для защиты от механических повреждений кабели имеют броню из двух стальных лент или оцинкованной проволоки. Броня или оболочка кабеля покрываются джутовым волокном, пропитанным битумной массой для защиты от химических воздействий. Марки кабелей содержат указания на материал жил, защитной оболочки и тип защитного покрова. Алюминиевая жила обозначается буквой А, стоящей на первом месте. Медная жила не обозначается. Материал защитной оболочки указывается буквами: С — свинец, А — алюминий. Буква Б обозначает наличие брони из стальных лент. Например, марка кабеля ААБ обозна-

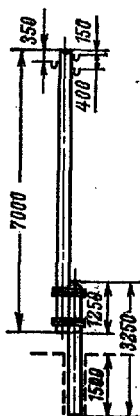


Рис. 12-23.

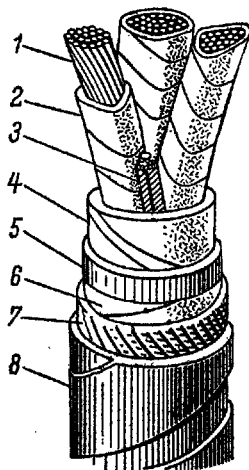


Рис. 12-24.

Рис. 12-23. Деревянная опора с «пасынком» для линии напряжением до 1 000 В.

Рис. 12-24. Трехжильный кабель марки СБГ или АСБГ.

1 — жилы кабеля; 2 — бумажная изоляция жил; 3 — заполнители; 4 — поясная бумажная изоляция; 5 — свинцовая оболочка; 6 — бумажно-битумное покрытие; 7 — кабельная пряжа; 8 — броня из двух стальных лент.

чает: алюминиевая жила, алюминиевая оболочка и стальная броня с джутово-битумным покрытием. Марка кабеля АСБ — алюминиевая жила, свинцовая оболочка и стальная броня, покрытая джутом и битумом. Кабель марки АСБГ отличается от предыдущего отсутствием джутового и битумного покрытия поверх стальной брони (Г — голый).

На рис. 12-24 показано устройство трехжильного кабеля, предназначенного для прокладки в кабельных туннелях и каналах внутри

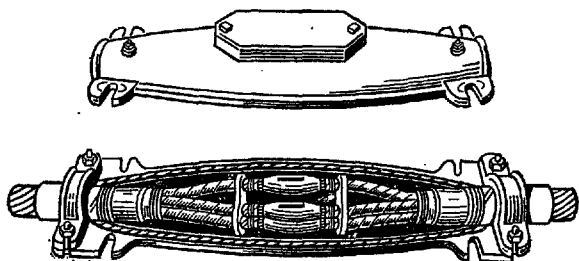


Рис. 12-25. Чугунная муфта для соединения концов кабелей.

здания. Кабели укладываются в траншеях шириной 25—50 см, глубиной 70—80 см от поверхности земли или в подземных коридорах-коллекторах.

Для соединения концов кабелей применяют свинцовые или чугунные кабельные муфты (рис. 12-25), заливаемые кабельной

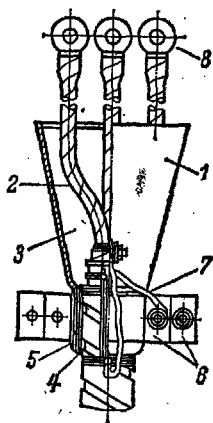


Рис. 12-26. Концевая заделка трехжильного кабеля в стальной воронке.

1 — стальная воронка; 2 — изолированная жила; 3 — заливка битумной массой; 4 — подмотка просмоленной лентой; 5 — бандаж из просмоленной ленты; 6 — полухомут для крепления; 7 — заземляющий провод; 8 — наконечник.

массой. Концы кабелей, присоединяемые к зажимам машины, трансформаторов, аппаратов, оконцовывают, т. е. заключают в специальные стальные концевые муфты, или стальные кабельные воронки (рис. 12-26), заполняемые кабельной массой. Иногда применяется «сухая заделка», без муфт.

6) Сети внутри зданий

Для канализации электрической энергии внутри зданий применяются провода, шнуры, кабели и шины.

Проводом называется отдельная проволока или жила — голая или изолированная. Провод имеет резиновую, поливинилхлоридную, найритовую или пропитанную хлопчатобумажную защитную оболочку.

Шнуром называют систему двух или несколько соединенных вместе изолированных гибких жил.

Шиной называется полосовая, реже круглая медь, алюминий или сталь.

Провода, шнуры и кабели бывают одножильные и многожильные; жилы могут быть однопроволочными и многопроволочными.

Жилы проводов и кабелей изготавливаются только стандартных сечений: 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240; 400; 500; 625 и 800 мм².

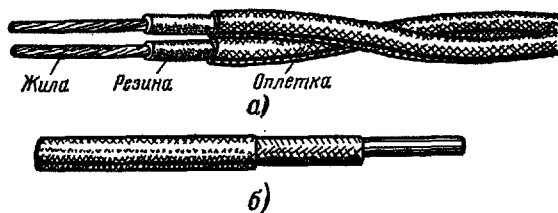


Рис. 12-27.

а — провод ПРД и шнур; б — провод ПР и АПР.

В силовых и осветительных установках наиболее часто применяются провода, шнуры и кабели следующих марок:

1. ПРД — провод гибкий в оплетке из хлопчатобумажной пряжи с медной жилой, с резиновой изоляцией, двухжильный (рис. 12-27, а). Изготавливается сечением от 0,75 до 6 мм² для установок напряжением до 380 В.

2. ПР и АПР — провода одножильные с резиновой изоляцией в оплетке из пропитанной хлопчатобумажной пряжи; первый — медный, а второй — алюминиевый (рис. 12-27, б). Изготавливаются сечением: первый от 0,75, а второй от 2,5 до 400 мм² для установок с напряжением до 660 В.

3. ПРГ — то же, что и ПР, но более гибкий с жилами из более тонких проволок.

4. ПВ и АПВ — провода, отличающиеся от проводов ПР и АПР только тем, что имеют поливинилхлоридную изоляцию. Изготавливаются сечением от 0,75 до 95 мм² для установок с напряжением до 660 В.

5. ПГВ — провод гибкий с поливинилхлоридной изоляцией. Изготавливается тех же сечений, что и провод ПВ для установок напряжением до 660 В.

6. ПРТО и АПРТО — провод с резиновой изоляцией в общей оплетке из хлопчатобумажной пряжи. Изготавливается сечением от 1 до 500 мм² одно-, двух-, трех- и четырехжильным для установок напряжением до 660 и до 2 000 В.

7. ПРП — провод с резиновой изоляцией — паницирный, защитный; паницирь выполнен из тонких стальных оцинкованных проволочек. Изготавливается сечением от 1 до 95 мм² одно-, двух- и трехжильным для установок напряжением до 660 В.

8. ТПРФ — провод медный с резиновой изоляцией в трубчатой металлической оболочке. Изготавливается сечением от 1 до 10 мм², одно-, двух-, трех- и четырехжильным для установок напряжением до 660 В.

9. ШР — шнур с резиновой изоляцией, двухжильный; применяется в тех же случаях, что и ПРД, но отличается от последнего большей



Рис. 12-28. Шнур ШВРШ.

1 — резиновый защитный шланг; 2 — резиновая изоляция; 3 — медная жила.

гибкостью (рис. 12-27, а). Изготавливается сечением от 0,5 до 1,5 мм² для установок напряжением до 220 В.

10. ШВРШ — шнур переносный шланговый (рис. 12-28). Жилы с резиновой изоляцией заключены в общую защитную резиновую оболочку. Изготавливается трехжильным сечением 0,75 и 1 мм² на напряжение до 220 В. Шнур предназначен для присоединения подвижных электроприемников (пылесосы, электроинструмент и т. д.).

11. ППВ и АППВ — провода плоские (рис. 12-29) двух- и трехжильные в поливинилхлоридной изоляции, с медными или алюминиевыми жилами (АППВ), сечением: первый 0,75—2,5 мм², второй 2,5—4 мм², для установок с напряжением до 660 В.

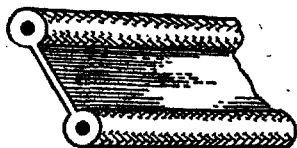


Рис. 12-29. Плоский двухжильный провод ППВ или АППВ.

12. СРБ и АСРБ — кабели с резиновой изоляцией, медными и алюминиевыми жилами сечением — 185 мм², оцинкованные, с броней из стальных лент, поверх которых положена оболочка из кабельной пряжи. Номинальное напряжение 500 В.

13. СРГ и АСРГ — то же, что и СРБ и АСРБ, но без стальной брони.

14. ВРГ — кабель с резиновой изоляцией в поливинилхлоридной оболочке и ВРБ — то же, что и ВРГ, но

с броней из стальных лент. Изготавливаются двух-, трех- и четырехжильными с сечением жил от 1—185 мм². Номинальное напряжение 500 В.

15. НРГ и АНРГ — кабель; первый с медными, а второй с алюминиевыми жилами, с резиновой изоляцией в найритовой оболочке. Изготавливаются одно-, двух-, трех- и четырехжильными с сечением жил 4—185 мм² на номинальное напряжение 500 В.

Применение и способы прокладки основных проводов и кабелей даны в табл. 12-1.

Применение проводов основных марок

Род проводки	Способ прокладки	Марки провода	Характер помещения						
			Сухие		Влажное	Сырое	Пыльное	С химически активной средой	Наружные установки
			административно-бытовые	производственные					
Открыто на изолирующих опорах	На роликах	ПР; ПРД; ПР; АПР; ПВ; АПВ	X	X	-	-	-	-	-
	На изоляторах	ПР; АПР; ПВ; АПВ Голые провода	X	+	+	+	X	+	+
Открыто без изолирующих опор	По поверхности стен и потолков	ТПРФ	X	+	-	-	+	-	-
		ВРГ; СРГ; АСРГ; НРГ; АНРГ; ППВ; АППВ	X	+	+	+	+	X	X
	В бумажных трубах с металлической оболочкой	ПР; АПР; ПВ; АПВ	X	X	-	-	X	-	-
В стальных трубах	В стальных трубах	ПР; АПР; ПРТО; АПРТО; ПВ; АПВ	X	X	X	X	X	X	X
			X	+	X	X	X	X	X

Род проводки	Способ прокладки	Марки провода	Характер помещения						
			Сухие		Влаж- ное	Сы- рое	Пыль- ное	С хими- чески активной средой	На- руж- ные устано- вки
			административно-бытовые	производственные					
Скрыто	В коробах	ПР; АПР; ПРТО; ПВ; АПВ	—	+	X	—	X	—	—
	В стеклянных трубах	ПР; АПР	+	X	—	—	X	—	—
	В стальных трубах	ПР; АПР ПРТО; АПРТО	X X	+	+	+	+	X	X
	В изоляционных полутвердых трубах	ПР; АПР	X	X	—	—	X	—	—
	В бумажных трубах с металлической оболочкой	ПР; АПР	X	X	X	—	X	—	—
	В строительных конструкциях и под штукатуркой	ПВ; АПВ; ПВ; АПВ; АПН	+	X	X	—	X	—	—

Условные знаки: + — рекомендуется; X — допускается; — — запрещается.

Оконцевание и соединение медных и алюминиевых многопроволочных жил проводов и кабелей выполняют опрессованием, сваркой или пайкой. Опрессование заключается в том, что токопроводящая жила вводится в трубчатую часть наконечника или в соединительную гильзу (трубку из того же материала, что и жила) и обжимается ручными клещами или гидравлическим прессом.

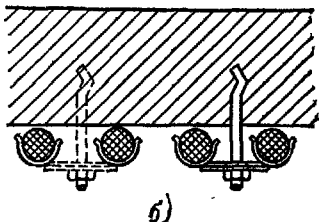
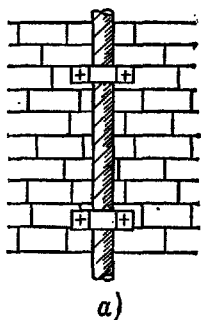


Рис. 12-30. Крепление кабеля.
а — на стене; б — на потолке.

Метод опрессования является очень надежным, простым и удобным. Электросварка применяется преимущественно для соединения и оконцевания алюминиевых жил.

При отсутствии возможности использовать опрессовку или сварку применяют пайку. Пайка медных жил производится в пламени паяльной лампы с применением оловянисто-свинцовых припоев и канифоли. Пайка алюминиевых жил выполняется с применением цинко-оловянистых припоев.

Силовые сети предприятий наиболее часто выполняются

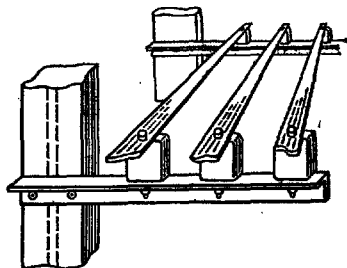
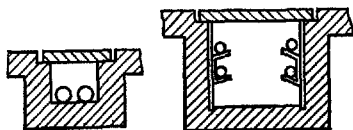


Рис. 12-31. Прокладка кабелей в каналах.

Рис. 12-32. Открытый шинопровод.

кабелем, шинами или изолированными проводами в стальных трубах или на изоляторах.

Осветительные сети предприятий преимущественно выполняются проводом в стальных трубах, проводом на изоляторах или роликах (открытая проводка) и на тросах (тросовая проводка).

Кабели прокладываются открыто или скрыто. В первом случае их прокладывают по стенам или потолкам, закрепляя скобами (рис. 12-30). Во втором случае кабели прокладывают в каналах, устраиваемых в полу (рис. 12-31). Оконцевание кабелей рассмотрено в § 12-3, а.

Шинопроводы бывают открытыми и закрытыми. Открытый шинопровод (рис. 12-32) представляет собой шины, закрепленные

на изоляторах, которые монтируются на стальных конструкциях, укрепляемых на стенах, колоннах, потолках или фермах. Ответвления к приемникам энергии выполняются проводами или кабелями.

Закрытые шинопроводы представляют собой шины, расположенные на изолирующих гребенках внутри стального короба (рис. 12-33). Они обычно собираются из отдельных нормальных секций длиной 3 м. Ответвления от шинопровода выполняются при помощи специальных коробок или ящиков, укрепляемых на коробе. Ящики содержат или только зажимы для присоединения проводов, или трубчатые предохранители и зажимы, от которых питание электроприемников осуществляется по изолированным проводам, в стальных трубах или металлических рукавах. Шинопроводы крепятся на стойках из стальных труб или кронштейнах, расположенных на стенах или колоннах (рис. 12-14), или подвешиваются на стальных растяжках к фермам.

Во взрыво- и пожароопасных помещениях применяется прокладка проводов в стальных трубах. Трубопроводы должны быть герметичными, а аппаратура и светильники — взрывобезопасными.

В производственных помещениях с разветвленной сетью трубы прокладываются скрыто — в полу. Соединения и ответвления проводов, проложенных в стальных трубах, выполняются в специальных коробках или ящиках.

Рис. 12-33. Закрытый шинопровод.

Прокладка изолированных проводов на роликах и изоляторах, так же как и шнуровая проводка, в настоящее время применяется редко.

В осветительных сетях промышленных предприятий широко применяются тросовые проводки. Различные варианты исполнения тросовой проводки показаны на рис. 12-34. Тросовые проводки заготавливают

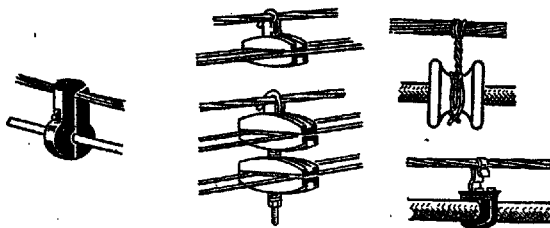


Рис. 12-34. Различные выполнения тросовой проводки изолированными проводами.

заранее с подвешенными светильниками и закрепленными проводами и на месте монтажа подвешивают их с помощью специальных натяжных устройств, закрепляемых на концах пролета.

Для тросовых проводок применяются специальные тросовые провода, представляющие собой одно целое с изолированным тросом. Ответ-

вления от таких проводов выполняются в коробках, укрепляемых на тресе.

Шнуровые проводки на роликах применяются редко. Для осветительных сетей бытовых помещений в настоящее время применяются плоские провода марок ППВ и АППВ. Они прокладываются как скрыто, так и открыто.

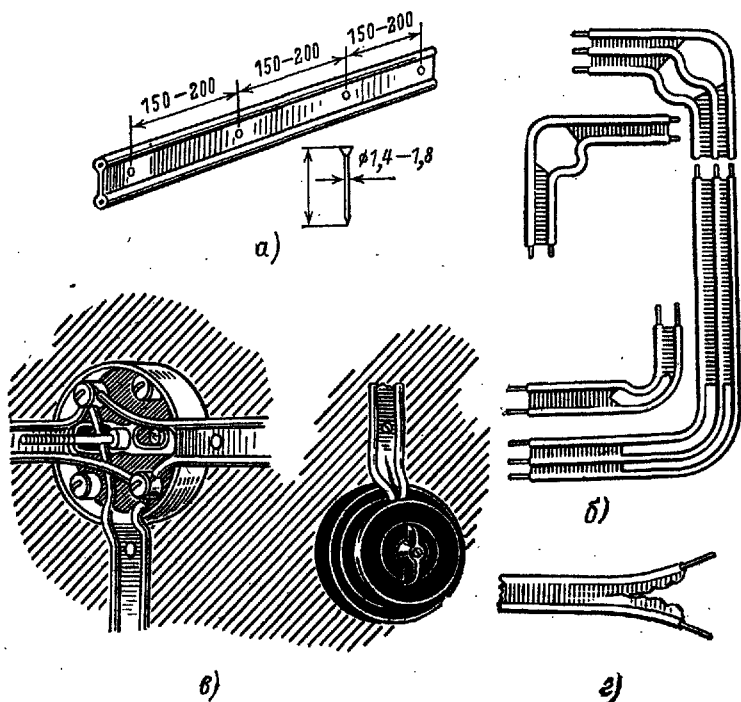


Рис. 12-35. Прокладка проводом ППВ.

а — прямолинейный участок; *б* — выполнение изгибов провода; *в* — коробка для соединения и ответвления провода; *г* — присоединение провода к выключателю.

Плоские провода очень удобны и просты для монтажа. При скрытой проводке они прокладываются непосредственно под штукатуркой без каких-либо дополнительных защитных оболочек. При открытой проводке они крепятся на стенах и потолках специальными сортами клея или просто гвоздями. На рис. 12-35 показаны некоторые детали такой проводки.

Осветительная сеть, помимо проводов, содержит патроны для ламп, штепсельные розетки, выключатели и плавкие предохранители или автоматические вы-

ключатели (автоматы), предназначенные для защиты сети от коротких замыканий.

Несколько предохранителей, смонтированных на общем основании, составляют групповой щиток (рис. 12-36).

Вид спереди

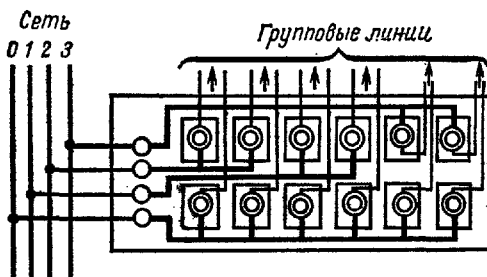
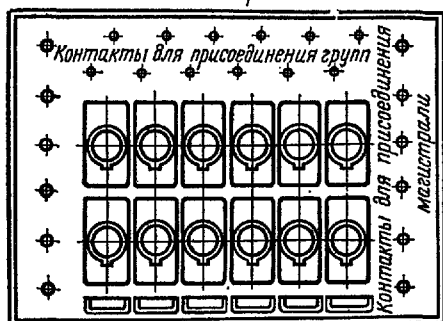


Рис. 12-36. Осветительный групповой щиток.

в) Определение сечения проводов по допустимому нагреву

При определении сечения проводов пользуются понятиями: 1) номинальная мощность P_n — указанная на электроприемнике; 2) установленная мощность P_y — сумма номинальных мощностей установленных приемников; 3) расчетная мощность P_p — мощность, по которой производится расчет. Указанным мощностям соответствуют токи I_n , I_y , I_p , которым присваиваются те же отличительные названия.

Практически все приемники энергии одновременно не включаются, а двигатели, кроме того, не все время загружены полностью, поэтому при расчете исходят не из установленной мощности, а из той части ее P_p , которая может одновременно использоваться потребителем.

Отношение расчетной мощности к установленной называют коэффициентом спроса:

$$k_c = \frac{P_p}{P_y} \quad \text{или} \quad k_c = \frac{I_p}{I_y}. \quad (12-1)$$

Коэффициенты спроса принимаются при осветительной нагрузке: а) для сетей наружного освещения $k_c = 1$; б) для сетей бытового освещения $k_c = 0,7 \div 0,8$; в) для сетей промышленных предприятий $k_c = 0,7 \div 0,9$.

При осветительной нагрузке расчетный ток для цепей однофазного переменного тока и для постоянного тока

$$I_p = \frac{k_c P_y}{U} = \frac{P_p}{U},$$

а для трехфазных цепей

$$I_p = \frac{k_c P_y}{\sqrt{3} U} = \frac{P_p}{\sqrt{3} U}.$$

При силовой нагрузке для цехов холодной обработки металлов при одном-двух установленных двигателях $k_c = 1$; при четырех — $k_c = 0,8$; при шести — $k_c = 0,6$.

Номинальный ток двигателей постоянного тока и трехфазных соответственно определяется по формулам:

$$I_n = \frac{P_n}{U \eta} \quad \text{и} \quad I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} U \eta \cos \varphi}, \quad (12-2)$$

где η — к. п. д. электродвигателя.

Значения η и $\cos \varphi$ для двигателей берутся из справочников или каталогов. При ориентировочных расчетах для двигателей небольшой мощности до 10—12 кВт величину произведения $\eta \cos \varphi$ можно считать равной 0,7—0,8.

Расчетный ток двигателей

$$I_p = k_c I_n = k_c I_y.$$

Определение сечения проводов по допустимому нагреву их производится обычно по табл. 12-2, в которой для стандартных сечений различных марок проводов даются предельно длительные допустимые токи I_d .

Допустимый ток провода должен быть не меньше расчетного, т. е.

$$I_d \geq I_p. \quad (12-3)$$

Таким образом, выбирается провод того сечения, допустимый ток которого равен расчетному или несколько больше его.

Пример 12-1. Определить расчетный ток в магистральных проводах трехфазной линии напряжением 220 В, если на конце ее присоединены три электродвигателя с номинальной мощностью $P_{н1} = 4,5$ кВт, $P_{н2} = 2,8$ кВт и $P_{н3} = 3,5$ кВт.

Выбрать сечение проводов марки ПР, проложенных в трубах, исходя из условий допустимого нагревания их.

Решение. Установленная мощность $P_y = 4,5 + 2,8 + 3,5 = 10,8$ кВт.

Расчетный ток в магистрали

$$I_p = \frac{k_c P_y \cdot 1000}{1,73 U \eta \cos \varphi} = \frac{0,9 \cdot 10,8 \cdot 1000}{1,73 \cdot 220 \cdot 0,7} = 35 \text{ А.}$$

Найденный расчетный ток $I_p = 35$ А совпадает с допустимым током $I_d = 35$ А для проводов сечением $S = 4 \text{ мм}^2$, марки ПР, проложенных

ключатели (автоматы), предназначенные для защиты сети от коротких замыканий.

Несколько предохранителей, смонтированных на общем основании, составляют групповой щиток (рис. 12-36).

Вид спереди

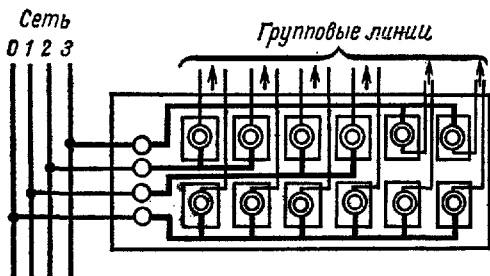
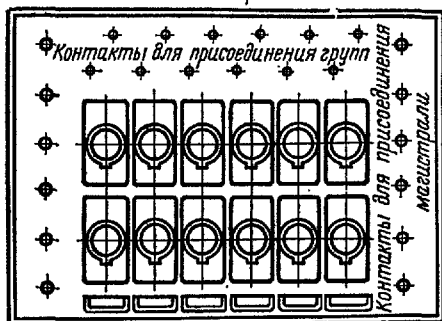


Рис. 12-36. Осветительный групповой щиток.

в) Определение сечения проводов по допустимому нагреву

При определении сечения проводов пользуются понятиями: 1) номинальная мощность P_n — указанная на электроприемнике; 2) установленная мощность P_y — сумма номинальных мощностей установленных приемников; 3) расчетная мощность P_p — мощность, по которой производится расчет. Указанным мощностям соответствуют токи I_n , I_y , I_p , которым присваиваются те же отличительные названия.

Практически все приемники энергии одновременно не включаются, а двигатели, кроме того, не все время загружены полностью, поэтому при расчете исходят не из установленной мощности, а из той части ее P_p , которая может одновременно использоваться потребителем.

Отношение расчетной мощности к установленной называют коэффициентом спроса:

$$k_c = \frac{P_p}{P_y} \quad \text{или} \quad k_c = \frac{I_p}{I_y}. \quad (12-1)$$

Коэффициенты спроса принимаются при осветительной нагрузке: а) для сетей наружного освещения $k_c = 1$; б) для сетей бытового освещения $k_c = 0,7 \div 0,8$; в) для сетей промышленных предприятий $k_c = 0,7 \div 0,9$.

При осветительной нагрузке расчетный ток для цепей однофазного переменного тока и для постоянного тока

$$I_p = \frac{k_c P_y}{U} = \frac{P_p}{U},$$

а для трехфазных цепей

$$I_p = \frac{k_c P_y}{\sqrt{3} U} = \frac{P_p}{\sqrt{3} U}.$$

При силовой нагрузке для цехов холодной обработки металлов при одном-двух установленных двигателях $k_c = 1$; при четырех — $k_c = 0,8$; при шести — $k_c = 0,6$.

Номинальный ток двигателей постоянного тока и трехфазных соответственно определяется по формулам:

$$I_n = \frac{P_n}{U \eta} \quad \text{и} \quad I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} U \eta \cos \varphi}, \quad (12-2)$$

где η — к. п. д. электродвигателя.

Значения η и $\cos \varphi$ для двигателей берутся из справочников или каталогов. При ориентировочных расчетах для двигателей небольшой мощности до 10—12 кВт величину произведения $\eta \cos \varphi$ можно считать равной 0,7—0,8.

Расчетный ток двигателей

$$I_p = k_c I_n = k_c I_y.$$

Определение сечения проводов по допустимому нагреву их производится обычно по табл. 12-2, в которой для стандартных сечений различных марок проводов даются предельно длительные допустимые токи I_d .

Допустимый ток провода должен быть не меньше расчетного, т. е.

$$I_d \geq I_p. \quad (12-3)$$

Таким образом, выбирается провод того сечения, допустимый ток которого равен расчетному или несколько больше его.

Пример 12-1. Определить расчетный ток в магистральных проводах трехфазной линии напряжением 220 В, если на конце ее присоединены три электродвигателя с номинальной мощностью $P_{н1} = 4,5$ кВт, $P_{н2} = 2,8$ кВт и $P_{н3} = 3,5$ кВт.

Выбрать сечение проводов марки ПР, проложенных в трубах, исходя из условий допустимого нагревания их.

Решение. Установленная мощность $P_y = 4,5 + 2,8 + 3,5 = 10,8$ кВт.

Расчетный ток в магистрали

$$I_p = \frac{k_c P_y \cdot 1000}{1,73 U \eta \cos \varphi} = \frac{0,9 \cdot 10,8 \cdot 1000}{1,73 \cdot 220 \cdot 0,7} = 35 \text{ А.}$$

Найденный расчетный ток $I_p = 35$ А совпадает с допустимым током $I_d = 35$ А для проводов сечением $S = 4 \text{ мм}^2$, марки ПР, проложенных

Допустимые длительные токовые нагрузки для изолированных проводов и кабелей с медными и алюминиевыми жилами

Сечение жилы, мм ²	Допустимые длительные нагрузки, А*					
	Провода марок ПР, ПРД, ПВ, ППВ, АПР, АПВ, проложенные открыто	Провода и кабели с медными жилами марок СРГ, СРБГ, ВРГ, ВРБГ, ТПРФ, ПРП, проложенные открыто		Провода ПР, ПРТО, ПРГ, ПВ, ПГВ, АПР, АПВ в одной трубе и ППВ, проложенные скрыто		Голые провода на открытом воздухе, однопровольные
		двухжильные	трехжильные	два провода	три провода	
1	17/—	—	—	16/—	15/—	—
1,5	23/—	19	19	19/—	17/—	—
2,5	30/24	27	25	27/20	25/19	—
4	41/32	38	35	38/28	35/28	50/40
6	50/39	50	42	46/36	42/32	70/55
10	80/55	70	55	70/50	60/47	95/75
16	100/80	90	75	85/60	80/60	130/105
25	140/105	115	95	115/85	100/80	180/135
35	170/130	140	120	135/100	125/95	220/170
50	215/165	175	145	185/140	170/130	270/215
70	270/210	215	180	225/175	210/165	340/265
95	330/255	260	220	275/215	255/200	415/325
120	385/295	300	260	315/245	290/220	485/375
150	440/340	350	305	360/275	330/255	570/440

* В числителе приведена нагрузка для медных жил, в знаменателе — для алюминиевых жил.

в трубах (табл. 12-2). Это сечение ($S = 4 \text{ мм}^2$) и выбираем для заданных условий.

Выбранное сечение проводов необходимо проверить по потере напряжения.

г) Определение сечения проводов по допустимой потере напряжения

Как известно (§ 2-10), потерей напряжения называется арифметическая разность напряжений в начале и конце линии:

$$\Delta U = U_1 - U_2.$$

Часто потерю напряжения выражают в процентах напряжения в начале линии, называя ее относительной потерей напряжения:

$$\varepsilon = \frac{\Delta U}{U} 100\%. \quad (12-4)$$

Допустимая относительная потеря напряжения на участке от подстанции до потребителя для осветительной нагрузки составляет 2—3%, а для силовой 4—6%.

В § 2-10 была получена формула (2-33) для определения сечения проводов двухпроводной линии постоянного тока

$$S = \frac{2Il}{\gamma \Delta U}.$$

Заменяв ΔU относительной потерей напряжения, получим:

$$S = \frac{2 \cdot 100Il}{\gamma \varepsilon U},$$

или, умножив и разделив на U , придадим формуле другой вид:

$$S = \frac{2 \cdot 100Pl}{\gamma \varepsilon U^2}. \quad (12-5)$$

Из последнего следует, что

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot 100Pl}{\gamma S U^2}. \quad (12-6)$$

По формулам (12-5) и (12-6) определяют сечение проводов линии с нагрузкой на конце ее по заданной относительной потере напряжения или соответственно определяют относительную потерю напряжения в линиях по заданному сечению проводов.

Эти формулы можно применять для цепей постоянного тока, для однофазных переменного и для трехфазных; в этом последнем случае множитель 2 в числителе должен быть отброшен, напряжение U является линейным напряжением, т. е. $U = U_{\text{л}}$, а мощность P — активной мощностью трехфазной нагрузки.

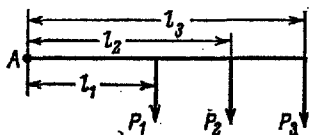


Рис. 12-37. Линия с тремя нагрузками.

Пример 12-2. Определить падение напряжения в трехфазной линии напряжением $U = 220$ В, выполненной проводом ПР, длиной $l = 15$ м, сечением $S = 4$ мм², если на конце ее присоединены три электродвигателя мощностью $P_1 = 4,5$ кВт, $P_2 = 2,8$ кВт и $P_3 = 3,5$ кВт (см. пример 12-1).

Решение. Мощность в цепи питания двигателей при номинальной нагрузке их

$$P = \frac{P_{\text{н1}}}{\eta_1} + \frac{P_{\text{н2}}}{\eta_2} + \frac{P_{\text{н3}}}{\eta_3} = \frac{4,5}{0,85} + \frac{2,8}{0,85} + \frac{3,5}{0,85} = 5,3 + 3,3 + 4,1 = 12,7 \text{ кВт.}$$

Расчетная мощность

$$P_p = k_c P = 0,9 \cdot 12,7 = 11,5 \text{ кВт.}$$

Воспользовавшись формулой (12-6), напишем:

$$\varepsilon = \frac{100 P_p l}{\gamma S U^2} = \frac{100 \cdot 11,5 \cdot 1000 \cdot 15}{57 \cdot 4 \cdot 220^2} \approx 2\%.$$

Таким образом, относительная потеря напряжения не превышает допустимой и, следовательно, выбранное по условиям допустимого нагревания сечение провода $S = 4$ мм² приемлемо.

Если линия, передающая энергию от питательного пункта А (рис. 12-37), имеет несколько нагрузок в разных точках ее, то при оди-

наковых сечений и материале всех участков линии определение сечения проводов для двухпроводных линий постоянного и однофазного переменного тока производится по формуле

$$S = \frac{2 \cdot 100 (P_1 l_1 + P_2 l_2 + P_3 l_3 + \dots)}{\gamma \varepsilon U^2} = \frac{2 \cdot 100 \sum Pl}{\gamma \varepsilon U^2}, \quad (12-7)$$

а относительная потеря напряжения

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot 100 (P_1 l_1 + P_2 l_2 + P_3 l_3 + \dots)}{\gamma S U^2} = \frac{2 \cdot 100 \sum Pl}{\gamma S U^2}. \quad (12-8)$$

Определение сечения проводов и относительной потери напряжения в трехфазных цепях производится по формулам, отличающимся от (12-7) и (12-8) только тем, что числители их не содержат множителя 2.

Две последние формулы отличаются от предыдущих (12-5) и (12-6) тем, что выражение Pl — произведение нагрузки P и длины линии l , называемое моментом нагрузки, заменено суммой моментов нагрузок (рис. 12-37).

Сечения проводов, найденные из условий допустимого нагрева, удовлетворяющие требованиям в отношении допустимой потери напряжения, проверяются по условиям механической прочности по табл. 12-3.

Таблица 12-3

Наименьшие сечения проводов, допустимые по механической прочности

Наименование проводов и способы их прокладки	Сечение, мм ²	
	медных проводов	алюминиевых проводов
Провода для зарядки светильников	0,5; 1	—
Провода в шланге для подвижных токоприемников	1 и 2,5	—
Изолированные провода в зданиях на изолирующих опорах, расположенных друг от друга на расстоянии, м:		
до 1	1,0	2,5
" 2	1,5	2,5
" 6	2,5	4
" 12	4	10
более 12	6	16
Неизолированные провода в зданиях	2,5	4
Изолированные и неизолированные защищенные провода в наружных проводках:		
по стенам	2,5	4
во всех других случаях	4	10
Изолированные провода в трубах	1	2,5
Воздушные линии до 1 000 В	6	16
Воздушные вводы при расстоянии до опоры 25 м	4	10

12-4. Защитное заземление

Установлено, что проходящий через тело человека электрический ток силой 50 мА является опасным для жизни, а ток силой 100 мА и выше смертельным. Известно, что сила тока зависит от напряжения и сопротивления цепи. Поэтому опасность поражения людей электрическим током повышается при увеличении напряжения и при уменьшении сопротивления человеческого тела. Всякое увлажнение кожи человека, загрязнение ее проводящими веществами, а также сырая обувь уменьшают сопротивление, увеличивая опасность поражения. Наоборот, увеличение сопротивления цепи тока, что можно достичь применением резиновых перчаток, резиновой обуви, резиновых ковров, уменьшают опасность поражения током.

Смертельные исходы имели место при напряжениях менее 60 В, так что допустимым при работе с переносными приборами и лампами в сухих помещениях с деревянными полами считают напряжение до 36 В, а при работе в сырых и жарких помещениях, в котлах, баках и т. д. напряжение до 12 В. При этом один зажим вторичной обмотки понижающего трансформатора, питающего эти электроприемники и его корпус, должны быть заземлены.

Для предохранения обслуживающего персонала от соприкосновения с частями установки, находящимися под напряжением, применяются защитные кожухи, ограждения или блокировка как самих устройств, находящихся под напряжением, так и помещений, в которых они находятся.

Для защиты обслуживающего персонала от поражения током при соприкосновении с металлическими частями электрооборудования, например корпусом электродвигателя или каркасом щита, нормально не находящихся под напряжением, но могущих оказаться под ним при повреждении изоляции электрооборудования, применяется **защитное заземление**.

Защитным заземлением называется преднамеренное соединение с землей металлических частей оборудования, нормально не находящихся под напряжением. Соединение с землей производится при помощи **заземлителя** — металлического проводника или группы проводников, находящихся в непосредственном соприкосновении с землей.

В трехфазных цепях с изолированной нейтралью (рис. 12-38) прикосновение к незаземленному корпусу электродвигателя с поврежденной изоляцией у одной из фаз вызовет прохождение через тело человека тока $I_{\text{ч}} = U / (r_{\text{из}} + r_{\text{ч}})$ (цепь замыкается через сопротивление изоляции других фаз), что опасно, так как сопротивление изоляции может быть невелико.

При наличии заземления корпуса двигателя (рис. 12-39) через поврежденную изоляцию и заземлитель пойдет ток заземления $I_{\text{зз}} = U / (r_{\text{из}} + r_{\text{зз}})$ и между корпусом двигателя и землей будет напряжение $U_{\text{зз}} = I_{\text{зз}} r_{\text{зз}}$, которое тем меньше, чем меньше сопротивление заземления. При прикосновении человека к корпусу он будет включен

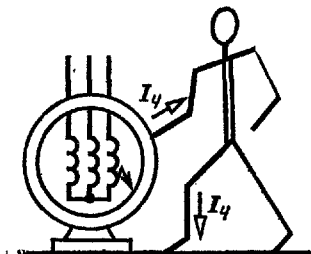


Рис. 12-38. Прикосновение к незаземленному корпусу двигателя с поврежденной изоляцией.

параллельно сопротивлению заземления и окажется под весьма малым напряжением $U_{\text{зз}} \ll U$, и опасность будет устранена.

Например, при $r_{\text{зз}} = 4$ Ом и сопротивлении тела человека $r_{\text{ч}} = 40\,000$ Ом ток, идущий через человека, будет в 10 000 раз меньше тока, идущего через заземлитель.

В цепях с изолированной нейтралью защитное заземление выполняют по схеме рис. 12-40, причем сопротивление заземления не должно быть больше 4 Ом, а при мощности питающего генератора или трансформатора не более 100 кВ·А сопротивление заземления должно быть не больше 10 Ом.

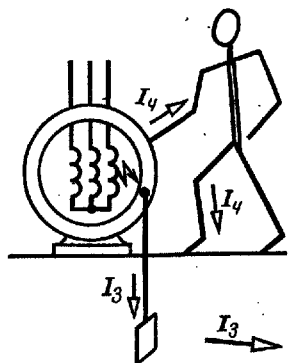


Рис. 12-39. Прикосновение к заземленному корпусу двигателя.

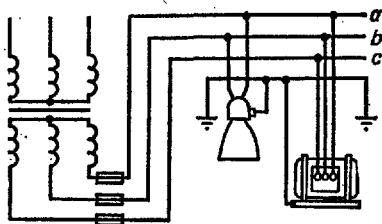


Рис. 12-40. Трехпроводная система тока с изолированной нейтралью.

В качестве заземлителей используют металлические конструкции зданий, оборудование, надежно соединенное с землей, трубопроводы (кроме газовых и горючими жидкостями), проложенные в земле. Если указанных конструкций нет, то заземлители выполняют

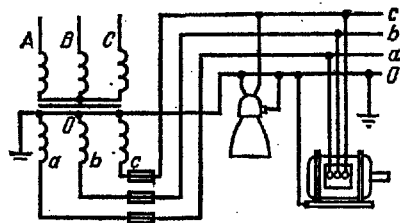


Рис. 12-41. Четырехпроводная система тока с глухозаземленной нейтралью.

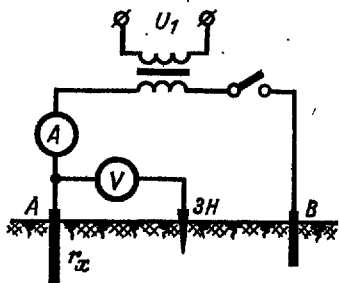


Рис. 12-42. Схема для измерения сопротивления заземления амперметром и вольтметром.

из обрезков стальных труб длиной 2—3 м, диаметром 35—40 мм с толщиной стенок не менее 3,5 мм или из угловой стали с толщиной полок не менее 4 мм. Число заземлителей должно быть не менее двух. Они забиваются в землю так, чтобы их верхний конец был ниже поверхности земли на 0,4—1,5 м и сваркой соединяются между собой стальными полосами толщиной не менее 4 мм.

Все заземляемые части электроустановок соединяются с заземлителем заземляющими проводниками из стальных полос сечением не менее 24 мм^2 , толщиной не менее 3 мм или из круглой стальной проволоки диаметром не менее 5 мм. Соединение их с оборудованием производится болтами или сваркой. Заземляющие провода окрашиваются в фиолетовый цвет.

Электрические установки для совместного питания осветительной и силовой нагрузки сооружаются обычно четырехпроводными напряжением 380/220 или 220/127 В. Четвертый — нулевой провод заземляется у источника питания и у потребителя (рис. 12-41) через весьма малое сопротивление и, естественно, имеет нулевой потенциал. К этому нулевому проводу присоединяются металлические части установок, нормально не находящиеся под напряжением, например корпуса электродвигателей, трансформаторов, светильников, обмотки измерительных трансформаторов, металлические каркасы щитов и т. д.

При заземлении одной из фаз, например a , возникает однофазное короткое замыкание и плавкий предохранитель или автомат отключает ее от источника питания. Фазные напряжения остальных фаз U_b и U_c остаются при этом без изменений.

Состояние заземления необходимо проверять не реже одного раза в год и измерять его сопротивление $r_{\text{зз}} = U/I$, пользуясь методом амперметра и вольтметра (рис. 12-42), где A — испытуемое заземление, B — вспомогательное заземление, а $ЗН$ — зонд — заземленный металлический штырь для присоединения вольтметра.

Основы промышленной электроники

Глава тринадцатая

Двухэлектродные лампы и их применение для выпрямления переменного тока

13-1. Классификация и применение электронных приборов

Электроника изучает принцип действия, устройство и применение электронных, ионных и полупроводниковых приборов.

Электронными называются приборы, в которых явление тока связано с движением только электронов при наличии в приборах высокого вакуума, исключающего возможность столкновения электронов с атомами газа. К этой группе приборов относятся, например, двух- и трехэлектродные лампы, некоторые фотоэлементы, электронолучевые трубки и др.

Электронные приборы применяются в выпрямителях, усилителях, генераторах, приемных устройствах высокой частоты, а также в автоматике, телемеханике, измерительной и вычислительной технике.

Ионными называются приборы, в которых явление тока обусловлено движением электронов и ионов, полученных при ионизации газа или паров ртути электронами. К ним относятся газотроны, тиратроны, ртутные вентили и др.

Ионные приборы отличаются от электронных значительной инерционностью процессов, обусловленных огромной массой иона по сравнению с массой электрона, поэтому

ионные приборы применяются в установках с частотой, не превышающей несколько килогерц — в выпрямителях средней и большой мощности, в схемах автоматического управления механизмами и др.

Полупроводниковыми называются приборы, в которых ток создается в твердом теле движением электронов и «дырок», и используются свойства полупроводников.

В последние годы резко возросло применение полупроводниковых приборов вследствие ряда преимуществ их перед электронными и ионными приборами. Главные из них: малый расход энергии, малые размеры, масса и стоимость, значительная механическая прочность, большой срок службы и простота эксплуатации. В ряде областей радиотехники, энергетики, автоматики, телемеханики и вычислительной техники полупроводниковые приборы с успехом заменяют электронные и ионные приборы.

13-2. Движение электронов в электрическом поле

В электронных приборах происходит движение электронов в электрическом поле в вакууме.

Допустим, что электрон, покинувший отрицательный электрод — катод, с достаточно малой начальной скоростью $v_0 \approx 0$ попадает в однородное электрическое поле (рис. 13-1) с напряженностью поля $\mathcal{E}$. Очевидно, на электрон действует постоянная сила поля (1-1)

$$F = e\mathcal{E} = e \frac{U}{d}, \quad (13-1)$$

направление которой противоположно направлению поля, так как заряд электрона отрицателен.

Под действием этой силы электрон получает ускорение, пропорциональное величине силы и обратно пропорциональное массе тела,

$$a = \frac{F}{m} = \frac{e\mathcal{E}}{m} = \frac{e}{m} \frac{U}{d}, \quad (13-2)$$

где e — заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; m — масса электрона, равная $9,1 \cdot 10^{-31}$ кг.

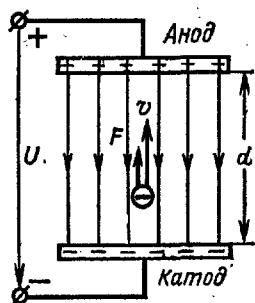


Рис. 13-1. Электрон в ускоряющем электрическом поле.

Отношение заряда электрона к его массе

$$e/m \approx 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг.}$$

В данном случае для электрона электрическое поле будет у с к о р я ю щ и м, так как направление начальной скорости v_0 совпадает с направлением силы F .

Двигаясь равноускоренно, электрон, пройдя путь d , достигнет положительного электрода (анода) со скоростью v и будет обладать при этом кинетической энергией

$$W = \frac{mv^2}{2}. \quad (13-3)$$

Эту энергию электрон приобрел на пути d в результате работы, совершенной силами поля.

Так как эта работа

$$A = Fd = e\mathcal{E}d = eU, \quad (13-4)$$

то, следовательно, энергия электрона

$$\frac{mv^2}{2} = eU, \quad (13-5)$$

т. е. работе сил поля на пути электрона с разностью потенциалов U .

Приняв заряд электрона за единицу при разности потенциалов $U = 1 \text{ В}$, получим единицу энергии электрона 1 электронвольт (эВ).

Так как заряд электрона равен $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, то

$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 1 \text{ В} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.}$$

Из (13-5) определим скорость электрона в произвольной точке ускоряющего поля

$$v = \sqrt{2 \frac{e}{m} U} \approx 600 \sqrt{U} \text{ [км/с]}. \quad (13-6)$$

Следовательно, скорость электрона в ускоряющем поле зависит от разности потенциалов между конечной и начальной точками пути электрона. Так, например, если электрон покинул катод лампы с малой скоростью $v \approx 0$, то при напряжении между катодом и анодом около 100 В он достигнет анода со скоростью

$$v = 600 \sqrt{100} \approx 6000 \text{ км/с.}$$

Определим время пролета электрона от катода до анода, если d — расстояние между ними. Средняя скорость рав-

ноускоренного движения $v_{\text{ср}} = (v_0 + v)/2 = v/2$, а время $t = d/v_{\text{ср}} = 2d/v$. Если в рассматриваемом примере $d = 2 \text{ см} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ км}$, то время пролета $t = 2d/v \approx 2 \times 2 \cdot 10^{-5} / 6 \cdot 10^8 \approx 0,7 \cdot 10^{-8} \text{ с}$.

Рассмотрим движение электрона в тормозящем поле. Допустим, что электрон вылетел с начальной скоростью $v_0 > 0$ с поверхности анода (рис. 13-2) и движется в направлении к катоду. Сила поля F , действующая на электрон, направлена противоположно полю, и, следовательно, противоположна начальной скорости электрона, который тормозится силой поля и движется равномерно

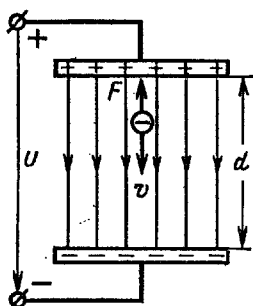


Рис. 13-2. Электрон в тормозящем электрическом поле.

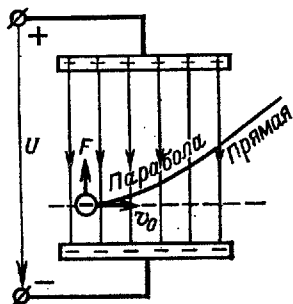


Рис. 13-3. Электрон в поперечном электрическом поле.

замедленно. Естественно, поле в этом случае называют тормозящим.

Кинетическая энергия, которой обладал электрон в начальный момент, $W_0 = mv_0^2/2$ при движении в тормозящем поле уменьшается, так как затрачивается на преодоление силы поля.

Если начальная энергия электрона W_0 больше той, которую надо затратить на движение электрона между электродами, т. е. $W_0 > W = eU$, то электрон, пройдя расстояние d между электродами, достигнет катода. Если же начальная энергия электрона меньше той, которую надо затратить для достижения катода, т. е. если $W_0 < W = eU$, то электрон, не достигнув катода, израсходует всю свою энергию и на момент остановится. Затем он под действием силы поля начнет равноускоренно двигаться в обратном направлении. Теперь электрон движется в ускоряющем поле, которое возвращает ему энергию, затраченную им до момента остановки.

Рассмотрим движение электрона в электрическом поле в направлении, перпендикулярном направлению поля. Допустим, что электрон, двигаясь в направлении, перпендикулярном электрическому полю, попадет в него со скоростью u_0 (рис. 13-3). Естественно, сила поля F , действующая на электрон, направлена как всегда в сторону, противоположную направлению поля. Таким образом, электрон одновременно движется в двух взаимно перпендикулярных направлениях: по инерции с постоянной скоростью в направлении, перпендикулярном полю, и под действием силы поля равноускоренно в направлении, противоположном полю. В результате электрон перемещается по параболе (рис. 13-3). Если электрон выйдет за пределы поля, то дальше он будет двигаться по инерции равномерно и прямолинейно.

13-3. Движение электронов в магнитном поле

В некоторых электронных приборах используется влияние магнитного поля на движущиеся в нем электроны.

В § 3-2, было получено выражение (3-6) для силы, с которой однородное магнитное поле действует на электрон, движущийся перпендикулярно направлению поля. Величина этой силы пропорциональна произведению магнитной индукции B , заряда электрона e и скорости его движения v в направлении, перпендикулярном направлению поля, т. е. $F = Bev$. Там же было установлено, что направление этой силы определяется по правилу левой руки.

Из выражения силы (3-6) следует, что при $v = 0$ сила $F = 0$, т. е. магнитное поле на неподвижный электрон не действует. Так как направление силы F перпендикулярно направлению скорости движения электрона, то работа, совершаемая ею, равна нулю. Таким образом, энергия электрона и величина его скорости остаются неизменными, а изменяется только направление движения электрона.

Если на электрон действует только магнитное поле, то он будет перемещаться по окружности радиуса r (рис. 13-4), расположенной в плоскости, перпендикулярной направлению поля.

Сила F является центростремительной и уравновешивается центробежной силой электрона mv^2/r .

Так как эти силы равны, то можно написать

$$mv^2/r = Bev, \quad (13-7)$$

откуда определяется радиус окружности

$$r = \frac{m}{e} \frac{v}{B}. \quad (13-8)$$

Отношение массы электрона к его заряду постоянно, следовательно, радиус окружности пропорционален скорости движения электрона и обратно пропорционален магнитной индукции поля.

Если начальная скорость электрона не перпендикулярна направлению поля, то ее следует разложить на две составляющие: нормальную, т. е. перпендикулярную к направлению поля v_n , и продольную, т. е. совпадающую по направлению с полем $v_{пр}$ (рис. 13-5).

Первая составляющая скорости v_n обуславливает движение электрона по окружности в плоскости, перпендикулярной к направлению поля, вторая составляющая $v_{пр}$ обуславливает равномерное и прямолинейное движение электрона в направлении поля, таким образом, движение электрона происходит по винтовой линии (рис. 13-5).

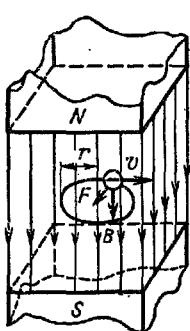


Рис. 13-4.

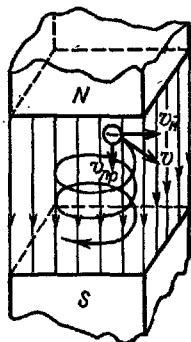


Рис. 13-5.

Рис. 13-4. Движение электрона в магнитном поле при начальной скорости v в плоскости, перпендикулярной вектору магнитной индукции поля.

Рис. 13-5. Движение электрона в магнитном поле при начальной скорости, направленной под острым углом к вектору магнитной индукции поля.

13-4. Электронная эмиссия

Под вакуумом понимают газ или воздух, находящийся в состоянии наивысшего разрежения (давление порядка 10^{-5} Па $\approx 10^{-7}$ мм рт. ст.). Вакуум является непроводящей средой, так как в нем содержится ничтожное количество электрически нейтральных частиц вещества.

Для получения в вакууме электрического тока необходим источник заряженных частиц — электронов, причем движение электронов в вакууме происходит практически без столкновений с частицами газа. Источником электронов

служит обычно металлический электрод — к а т о д. При этом используется явление выхода электронов с поверхности катода в окружающую среду, называемое электронной эмиссией.

Свободные электроны в металле при отсутствии внешнего электрического поля беспорядочно перемещаются между ионами кристаллической решетки.

При комнатной температуре выхода электронов из металла не наблюдается вследствие недостаточной величины

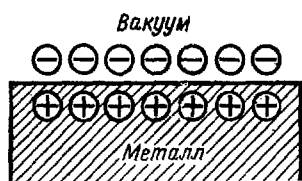


Рис. 13-6. Двойной электрический слой на поверхности металла.

их кинетической энергии. Часть электронов, обладающих наибольшей кинетической энергией, при своем движении выходит за поверхность металла, образуя электронный слой, который вместе с расположенным под ним в металле слоем положительных ионов кристаллической решетки образует двойной электрический слой (рис. 13-6). Электри-

ческое поле этого двойного слоя противодействует электронам, стремящимся выйти из проводника, т. е. является для них тормозящим.

Для выхода электрона за пределы поверхности металла электрону необходимо сообщить энергию, равную работе, которую он должен совершить по преодолению тормозящего действия поля двойного слоя. Эта работа называется работой выхода (W_a). Отношение энергии выхода к заряду электрона называется потенциалом выхода, т. е. $\phi_a = W_a/e$.

Работа (потенциал) выхода зависит от химической природы металла.

Значения потенциала выхода для некоторых металлов даны в табл. 13-1.

Таблица 13-1

Металл	Потенциал выхода, В	Металл	Потенциал выхода, В
Цезий	1,81	Вольфрам	4,4
Барий	2,1	Ртуть	4,5
Торий	3,35	Никель	5,3

В зависимости от того, каким способом сообщается электронам дополнительная энергия, необходимая для выхода

из металла, различают виды эмиссии: термоэлектронную, электростатическую, фотоэлектронную, вторичную и под ударами тяжелых частиц.

Термоэлектронной эмиссией называется явление выхода электронов из катода, обусловленное исключительно нагревом катода. При нагревании металла скорости движения электронов и их кинетическая энергия увеличиваются и число электронов, покидающих металл, возрастает. Все электроны, вылетающие из катода в единицу времени, если они удаляются от катода внешним полем, образуют электрический ток эмиссии I_e . При повышении температуры катода ток эмиссии растет сначала медленно, а затем все быстрее и быстрее. На рис. 13-7 даны кривые плотности тока эмиссии, т. е. тока эмиссии, отнесенного к единице поверхности катода, выраженной в А/см^2 , в зависимости от температуры T для различных катодов.

Зависимость плотности эмиссионного тока j_e от температуры и работы выхода выражается уравнением Ричардсона — Дэшмана:

$$j_e = AT^2 e^{-\frac{W_a}{kT}}, \quad (13-9)$$

где A — постоянная эмиссии; для металлов она равна $15-350 \text{ А/см}^2 \cdot \text{К}^2$;

T — абсолютная температура катода, К;

e — основание натуральных логарифмов;

W_a — работа выхода, эВ;

$k = 8,56 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}$ — постоянная Больцмана.

Таким образом, плотность тока эмиссии увеличивается

пропорционально T^2 и $e^{-\frac{W_a}{kT}}$, так что для получения большого тока эмиссии необходим катод из материала с малой работой выхода и высокой рабочей температурой.

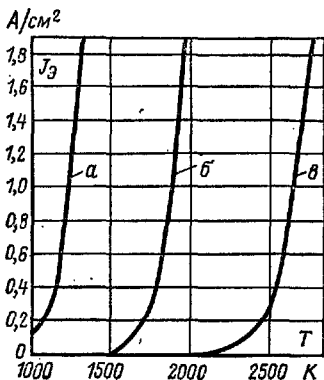


Рис. 13-7. Кривые плотности тока эмиссии в зависимости от температуры для различных катодов.

a — оксидный; b — вольфрамовый, покрытый торием; v — вольфрамовый без покрытия.

Если электроны, вылетевшие из катода (эмиттированные электроны), не удаляются от него внешним ускоряющим полем, то они скапливаются вокруг катода, образуя объемный отрицательный заряд (электронное облако), который создает вблизи катода тормозящее электрическое поле, препятствующее дальнейшему вылету электронов из катода.

Электростатической электронной эмиссией называется явление выхода электронов из поверхности катода, обусловленное исключительно наличием у поверхности катода сильного электрического поля.

Сила, действующая на электрон, находящийся в электрическом поле, пропорциональна заряду электрона и напряженности поля $F = e\mathcal{E}$. При достаточно большой напряженности ускоряющего поля силы, действующие на электрон, находящиеся у поверхности катода, становятся достаточно большими для преодоления потенциального барьера и вырывания электронов из холодного катода.

Электростатическая эмиссия находит применение в ртутных вентилях и некоторых других приборах.

Фотоэлектронной эмиссией называется явление выхода электронов, обусловленное исключительно действием излучения, поглощаемого катодом, и не связанное с его нагреванием. При этом электроны катода получают дополнительную энергию от частиц света — **фотонов**.

Лучистая энергия испускается и поглощается определенными порциями — **квантами**. Если энергия кванта, определяемая произведением постоянной Планка h , и частоты излучения ν , т. е. $W_{\text{кв}} = h\nu$, больше работы выхода W_a для материала данного катода то электрон может покинуть катод, т. е. будет иметь место фотоэлектронная эмиссия.

Фотоэлектронная эмиссия применяется в фотоэлементах.

Вторичной электронной эмиссией называется явление выхода вторичных электронов, обусловленное исключительно ударами первичных электронов о поверхность тела (проводника, полупроводника). Летящие электроны, называемые **первичными**, встречая на пути проводник, ударяются о него, проникают в его поверхностный слой и отдают часть своей энергии электронам проводника. Если дополнительная энергия, получаемая электронами при ударе, будет больше работы выхода, то эти электроны могут выйти за пределы проводника.

Первичный электрон, обладающий значительной энергией, может отдать ее или одному или нескольким электро-

нам, следовательно, число вторичных электронов может быть больше первичных.

Вторичная электронная эмиссия характеризуется коэффициентом вторичной эмиссии σ , равным отношению числа вторичных электронов n_2 к числу первичных n_1 :

$$\sigma = n_2/n_1 = I_2/I_1, \quad (13-10)$$

а ток вторичной эмиссии

$$I_2 = \sigma I_1.$$

Величина коэффициента вторичной эмиссии зависит от свойств эмиттера, а также от скорости и направления первичных электронов.

В электронных приборах с несколькими электродами вторичные электроны летят к электроду с более высоким положительным потенциалом.

Вторичная электронная эмиссия используется, например, в фотоэлектронных умножителях для усиления тока.

Вторичная эмиссия может наблюдаться в электронных лампах, в которых анод подвергается воздействию электронов, летящих от катода. В этом случае вторичные электроны могут создать поток, встречный «рабочему», ухудшающий работу лампы.

Электронной эмиссией под ударами тяжелых частиц называется явление выхода электронов, обусловленное исключительно ударами ионов или возбужденных атомов (молекул) о поверхность тела — электрода. Этот вид эмиссии аналогичен рассмотренной выше вторичной электронной эмиссии.

13-5. Катоды электровакуумных приборов

а) Определения, характеристики, параметры

К а т о д о м электровакуумного прибора называется электрод, основным назначением которого является испускание электронов.

Наиболее широкое применение получили термоэлектронные катоды, действие которых основано на использовании явления термоэлектронной эмиссии. Эти катоды в дальнейшем будем называть просто катодами.

Для получения необходимой величины электронной эмиссии катоды нагревают до определенной температуры

электрическим током, называемым током накала. По способу нагревания катоды делятся на катоды прямого накала и катоды косвенного накала или подогревные.

В первом случае ток накала проходит непосредственно через катод, во втором катод получает тепло от изолированного от него подогревателя, по которому проходит ток накала.

Зависимость тока эмиссии от напряжения накала (напряжение на зажимах катода), т. е. $I_a = f(U_n)$, называется эмиссионной характеристикой (рис. 13-8). При малых напряжениях накала ток накала и температура

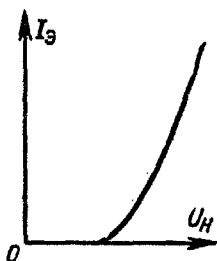


Рис. 13-8. Эмиссионная характеристика катода.

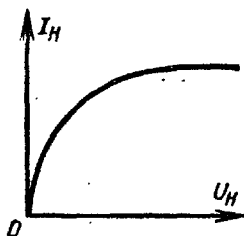


Рис. 13-9. Накальная характеристика катода.

катода малы и эмиссии нет. При некотором начальном значении напряжения U_n температура катода становится достаточной для термоэлектронной эмиссии и появляется ток эмиссии, который быстро растет с увеличением напряжения U_n .

Зависимость тока накала от напряжения накала, т. е. $I_n = f(U_n)$, называется накальной характеристикой катода (рис. 13-9).

Увеличение напряжения U_n вызывает увеличение тока накала и температуры катода. При этом происходит увеличение его сопротивления, так что рост тока накала с увеличением напряжения U_n замедляется.

Основные свойства катода характеризуются его параметрами:

1. Эмиссионная способность катода определяется удельной эмиссией или плотностью эмиссионного тока j_a (13-9) при номинальной температуре катода. Она у современных катодов имеет значение порядка сотен миллиампер на квадратный сантиметр.

2. Удельная мощность накала — это мощность накала катода, отнесенная к 1 см^2 его поверхности, т. е.

$$P'_n = \frac{P_n}{S} = \frac{U_n I_n}{S}. \quad (13-11)$$

Из мощности P_n , расходуемой на нагревание катода, только 2—3% превращается в кинетическую энергию электронов, покидающих катод, а остальная часть рассеивается в окружающую среду излучением и теплопроводностью.

3. Эффективность или экономичность катода определяется отношением эмиссионного тока к мощности нагревания катода, т. е.

$$H = \frac{I_a}{P_n} = \frac{I_a}{U_n I_n}. \quad (13-12)$$

Чем больше эмиссионный ток, приходящийся на каждую единицу мощности накала катода, тем больше эффективность катода. У современных катодов эффективность изменяется от единиц до сотен миллиампер на ватт.

4. Рабочая температура у различных катодов имеет значение от 600 до 2 400 °С.

Повышение температуры катода вызывает увеличение эмиссии, повышение эффективности и уменьшение срока службы катода.

5. Долговечностью катода или сроком службы его называется время, в течение которого эмиссионный ток уменьшается на 20% от своего номинального значения. Долговечность катодов составляет около 1 000 ч.

б) Типы термоэлектронных катодов

Выше (§ 13-4) уже отмечалось, что материал катода должен обеспечить малый потенциал выхода и выдерживать высокую температуру. Последнее обстоятельство требует изготовления катодов из тонкой проволоки, обладающих достаточной прочностью при высокой рабочей температуре катода.

Одним из таких металлов является вольфрам с потенциалом выхода 4,4 В, с температурой плавления 3 500 °С и рабочей температурой 2 300 °С. Удельная эмиссия вольфрамовых катодов 0,3—0,7 А/см², эффективность не превышает 15 мА/Вт, а долговечность около 1 000 ч.

Низкая эффективность вольфрамового катода делает его применение весьма ограниченным.

Устойчивость (неизменность по времени) его эмиссии и стойкость к ударам ионов (к ионной бомбардировке) обеспечивают применение вольфрамовых катодов в мощных и в высоковольтных лампах, а также в специальных электрометрических лампах.

Значительно меньший потенциал выхода по сравнению с катодами из чистых металлов имеют пленочные катоды, у которых поверхность основного металла покрыта тончайшей (одноатомной) пленкой другого металла с меньшей работой выхода. Например, одноатомный слой бария ($\phi_a = 2,1$ В), нанесенный на вольфрам ($\phi_a = 4,4$ В),

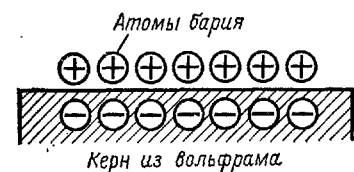


Рис. 13-10. Двойной электрический слой, образованный поляризованными атомами бария.

уменьшает потенциал выхода до 1,44 В. Это объясняется тем, что при таком покрытии (рис. 13-10) атомы бария поляризуются. Отрицательные заряды, смещаясь, образуют внутреннюю пленку, а положительные — наружную, т. е. образуется двойной электрический слой. Внутри слоя электрическое поле направлено внутрь, следовательно, для выходящих из металла электронов поле является ускоряющим, что и приводит к уменьшению работы выхода. Следовательно, для получения нужной эмиссии требуется меньшая температура катода. Такие пленочные катоды называются активированными.

Бариевый катод имеет наибольшую эффективность до 150 мА/Вт и наиболее низкую рабочую температуру около 600 °С, долговечность его составляет 1 500 ч. Бариевый катод не может работать при высоком анодном напряжении, так как он чувствителен к ионной бомбардировке. Бариевые катоды изготавливаются только прямого накала.

Наибольшее распространение получили оксидные катоды — полупроводниковые с активным слоем более значительной толщины, чем у пленочных катодов. Этот катод состоит из вольфрамового или никелевого стержня (керна), на который наносится оксидный полупроводниковый слой, состоящий из смеси окисей бария, стронция и кальция с вкрапленными атомами металлического бария. Оксидный катод имеет большую эффективность до 100—150 мА/Вт, низкую рабочую температуру 700—900 °С и

большую долговечность, исчисляемую несколькими тысячами часов.

Катод прямого накала представляет собой более или менее тонкую вольфрамовую проволоку (нить) или ленту, нагреваемую проходящим по ней током накала. При малой длине нити она натягивается пружинкой между двумя держателями, при большей длине ей придают V- или W-образную форму или выполняют в виде цилиндрической спирали. Катоды мощных приборов изготавливаются из ленты, которой придают волнообразную или спиральную форму (рис. 13-11).

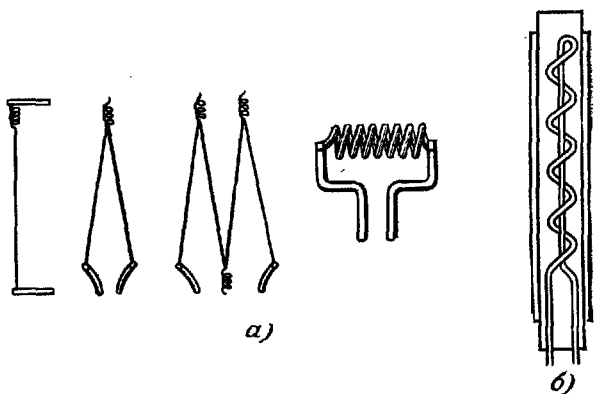


Рис. 13-11. Устройство катодов.

а — прямого накала.; *б* — косвенного накала.

Преимуществом катода прямого накала является простота устройства и малая мощность накала.

К недостаткам этих катодов относится колебание (пульсация) температуры катодов с малой тепловой инерцией при питании их переменным током, так как мгновенное значение тепла, получаемое катодом, изменяется пропорционально квадрату мгновенного значения тока. Эти колебания температуры вызывают и соответствующие колебания (пульсации) электронной эмиссии.

Кроме того, в катодах прямого накала прохождение тока накала вызывает изменение потенциала по длине катода. Следовательно, отдельные точки катода находятся под различными анодными напряжениями, что при питании катода переменным током приводит к колебаниям анодного тока.

В катодах косвенного накала источник электронов — катод электрически изолирован от нагревателя. Поэтому недостатки, свойственные катодам прямого накала, у него отсутствуют.

Наиболее распространенный подогревный катод представляет собой вольфрамовую спираль, изолированную слоем алунда (окись алюминия Al_2O_3). Она расположена внутри никелевого цилиндра, покрытого снаружи тонким оксидным слоем, с поверхности которого происходит эмиссия электронов. Подогреватель, имеющий два вывода, изолирован от никелевого цилиндра, имеющего третий вывод, так что все точки поверхности катода имеют один и тот же потенциал. Подогревный катод обладает значительной массой, большой тепловой инерцией и большой мощностью накала. Эффективность такого катода составляет 30—35 мА/Вт, т. е. значительно меньше, чем у катодов прямого накала. Вследствие большой тепловой инерции подогревные катоды не дают пульсации тока эмиссии при питании подогревателя переменным током. По той же причине время разогрева составляет несколько десятков секунд, т. е. значительно больше, чем у катодов прямого накала.

13-6. Двухэлектродные электронные лампы — диоды

а) Устройство и принцип действия диодов

Диод представляет собой простейшую электронную лампу, имеющую два электрода — катод и анод.

Диод имеет металлический, керамический или стеклянный баллон, в котором создан высокий вакуум (10^{-5} Па $\approx \approx 10^{-7}$ мм рт. ст.). В баллоне укреплены два электрода (рис. 13-12). Анод A из никеля имеет цилиндрическую или иную плоскую форму. Внутри анода расположен катод K прямого или косвенного накала, устройство которого рассмотрено выше. Выводы электродов или присоединяются к штырькам, впрессованным в пластмассовый цоколь лампы, или выводятся непосредственно через стекло колбы. Анод соединен с одним штырьком. Катод прямого накала соединен с двумя штырьками, катод косвенного накала — с тремя. У высоковольтных диодов вывод от анода часто располагается в верхней части лампы (рис. 13-12).

Условные обозначения на схемах диодов с катодами прямого и косвенного накала показаны на рис. 13-12.

Ток накала I_H (рис. 13-13) получается от батареи накала с напряжением порядка нескольких вольт или нескольких десятков вольт или от вторичной обмотки понижающего трансформатора. Накаленный катод излучает электроны.

Для того чтобы эти электроны попадали на анод, необходимо ускоряющее электрическое поле между анодом и катодом. Для создания этого поля анод лампы соединяется с положительным зажимом анодной батареи, а отрицательный зажим ее — с катодом лампы (рис. 13-13, а). Разность потенциалов между анодом и катодом лампы называется *анодным напряжением* U_a . Электроны, покидающие катод и достигающие анода, создают в цепи *анодный ток* I_a . Если анод лампы соединить с отрицательным зажимом батареи, а ее положительный зажим соединить с катодом лампы, т. е. подвести к лампе обратное анодное напряжение (рис. 13-13, б), то электрическое поле между анодом и катодом лампы для электронов, вылетающих из катода, будет

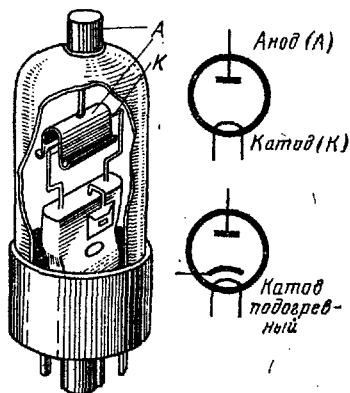


Рис. 13-12. Устройство диода и его обозначение на схемах.

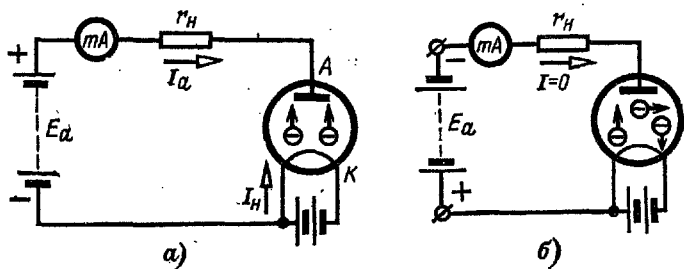


Рис. 13-13. Схемы включения диода.

а — анодное напряжение прямое; б — анодное напряжение обратное.

не ускоряющим, а тормозящим, и под действием его электроны, покинувшие катод, вернутся на него обратно и тока в анодной цепи не будет.

Таким образом, диод обладает односторонней проводимостью, т. е. ток через него проходит только в одном на-

правлении от анода к катоду, что означает движение электронов в обратном направлении. Устройства, обладающие односторонней проводимостью, называются *электрическими вентилями*.

При отсутствии эмиссии (катод не нагрет) и приложенном анодном напряжении между электродами диода возникает электрическое поле. Допустим, ради упрощения, что электроды плоские и расположены параллельно друг другу.

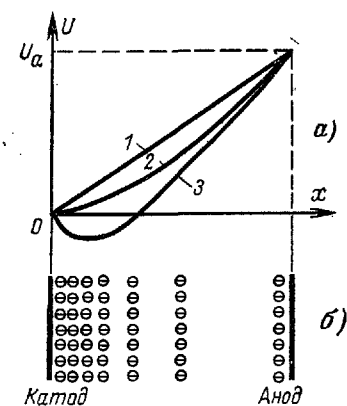


Рис. 13-14. Кривые изменения потенциалов между катодом и анодом в диоде (а). Плотность объемного заряда между катушками и анодом (б).

В этом случае поле будет однородным. Так как потенциал катода принято считать равным нулю, то потенциалы точек этого поля от нуля на поверхности катода ($\varphi_k = 0$) растут пропорционально расстоянию x от катода, достигая у анода значения, равного анодному напряжению $\varphi_a = U_a$. Графически это показывает прямая 1 на рис. 13-14, а.

При накале катода и наличии эмиссии электронов они заполняют пространство между электродами и этим создают *объемный отрицательный заряд*, поле которого является тормозящим для электронов, покидающих катод. Это поле, накладываясь на основное поле анода, снижает потенциал всех точек поля (кривая 2 на рис. 13-14, а). Распределение потенциалов в этом поле при неизменном анодном напряжении зависит от плотности объемного заряда в отдельных точках поля. Анодный ток в любом сечении пути между катодом и анодом остается неизменным, а скорость электронов по мере приближения к аноду увеличивается, следовательно, концентрация электронов от наибольшей у катода уменьшается по мере приближения к аноду. Это распределение концентрации электронов показано на рис. 13-14, б. У катода, где плотность объемного заряда наибольшая, происходит и наибольшее снижение потенциала.

Объемный заряд и его влияние на поле диода увеличиваются с увеличением тока эмиссии.

Из кривой 2 (рис. 13-14, а), дающей распределение потенциала результирующего поля, при относительно неболь-

шой эмиссии видно, что для всех точек поля потенциалы положительны. При увеличении тока накала до нормального и соответствующего увеличению эмиссии плотность объемного заряда возрастает и потенциалы точек результирующего поля вблизи катода становятся отрицательными (кривая 3, рис. 13-14, а).

Если потенциал поля по мере удаления от катода увеличивается, то каждый электрон, покинувший катод, попадая в ускоряющее поле, достигает анода, следовательно, анодный ток равен току эмиссии $I_a = I_e$. Такой режим работы лампы называется режимом насыщения, а анодный ток — током насыщения. Естественно, при этом режиме повышение анодного напряжения не вызывает увеличения анодного тока, так как для этого необходимо увеличить эмиссию, которая зависит только от температуры катода.

Если вследствие объемного заряда потенциалы точек в прилегающем к катоду слое отрицательны, т. е. поле в этом слое для электронов, вылетающих из катода, замедляющее, то электроны задерживаются в нем и объемный заряд увеличивается. При этом часть электронов, покидающих катод с меньшими скоростями, возвращается обратно на катод, а другая часть, обладающая большими энергиями, пройдя тормозящее поле, достигает анода, так что анодный ток меньше тока эмиссии, т. е. $I_a < I_e$. Такой режим работы лампы называется режимом пространственного заряда. При увеличении анодного напряжения, когда все точки поля имеют положительный потенциал, анодный ток достигает значения тока эмиссии и наступает режим насыщения.

6) Характеристики и параметры диодов

Зависимость анодного тока от анодного напряжения при неизменном напряжении накала, т. е. $I_a = f(U_a)$ при $U_n = \text{const}$, называется анодной (или вольт-амперной) характеристикой диода. Схема для снятия этой характеристики приведена на рис. 13-15. На рис. 13-16 сплошными линиями изображены две анодные характеристики, снятые при различных напряжениях накала.

При нулевом значении анодного напряжения $U_a = 0$ через диод проходит незначительный ток I_{a0} , называемый начальным током диода, обусловленный теми вылетающими из катода электронами, кинетическая энергия

которых достаточно велика для достижения анода. Для того чтобы уменьшить этот ток до нуля, необходимо создать между электродами некоторое тормозящее поле, подведя к лампе обратное анодное напряжение $U_{зап}$ порядка 1 В, называемое *з а п и р а ю щ и м*.

С увеличением положительного анодного напряжения анодный ток сначала растет медленно, а затем рост тока убыстряется. Это объясняется тем, что с увеличением анодного напряжения уменьшается отрицательный объемный заряд, тормозящий движение электронов, и увеличивается напряженность ускоряющего анодного поля. Когда анодное

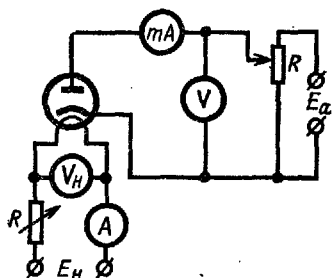


Рис. 13-15. Схема соединения для снятия характеристик диода.

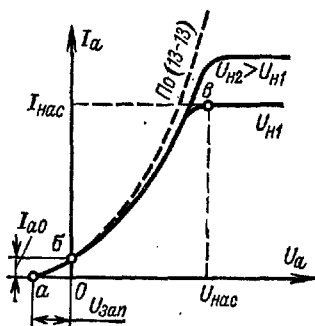


Рис. 13-16. Анодные характеристики диода.

напряжение достигнет величины, при которой все покидающие катод электроны достигают анода, наступает режим насыщения $I_a = I_s$ и дальнейшее повышение напряжения по-разному влияет на анодный ток; у вольфрамового катода он практически не увеличивается, у барьерного — увеличивается незначительно, у оксидного — более значительно.

Зависимость анодного тока от анодного напряжения в пределах восходящей части анодной характеристики можно выразить формулой, носящей название *закона степени трех вторых*:

$$I_a = gU_a^{3/2}, \quad (13-13)$$

т. е. анодный ток пропорционален анодному напряжению в степени трех вторых, где g — коэффициент пропорциональности, зависящий от формы и размеров электродов.

Характеристики, полученные опытным путем, в пределах восходящей части проходят несколько ниже характеристики, полученной расчетным путем по формуле (13-13).

Для приближенных расчетов иногда реальную характеристику заменяют приближенной (рис. 13-17) в виде отрезков прямых (кусочно-линейная аппроксимация).

П а р а м е т р а м и лампы называются величины, характеризующие основные свойства лампы.

Параметрами диода являются: внутреннее сопротивление, крутизна характеристики, допустимая мощность, выделяемая на аноде, допустимое обратное напряжение.

Сопротивлением диода при постоянном токе или статическим сопротивлением диода называется отношение анодного

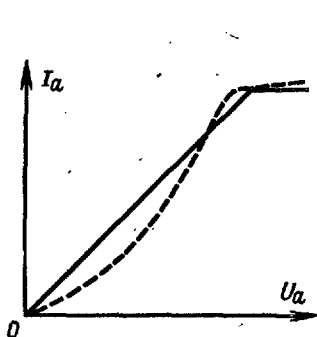


Рис. 13-17. Анодная характеристика диода (штриховая линия) и ее кусочно-линейная аппроксимация.

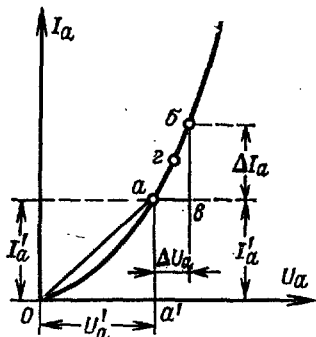


Рис. 13-18. Определение статического сопротивления диода.

напряжения к соответствующему анодному току, например для точки a (рис. 13-18) вольт-амперной характеристики статическое сопротивление

$$R_0 = \frac{U'_a}{I'_a}. \quad (13-14)$$

Из анодной характеристики диода видно, что для различных точек ее отношение U_a/I_a , т. е. статическое сопротивление диода, различно.

Допустим, что кроме постоянного напряжения — постоянной слагающей напряжения U_{a0} , между анодом и катодом действует еще переменное напряжение — переменная слагающая напряжения с амплитудой ΔU_a . На рис. 13-19, б показаны графики этой слагающей напряжений и суммарного напряжения u_a . По этим графикам и вольт-амперной характеристике (рис. 13-19, а) диода построены графики

постоянной составляющей тока I_{a0} , переменной составляющей тока с амплитудой ΔI_a и суммарного пульсирующего тока i_a (рис. 13-19, в).

Отношение приращения анодного напряжения ΔU_a к соответствующему приращению анодного тока ΔI_a называется дифференциальным или внутрен-

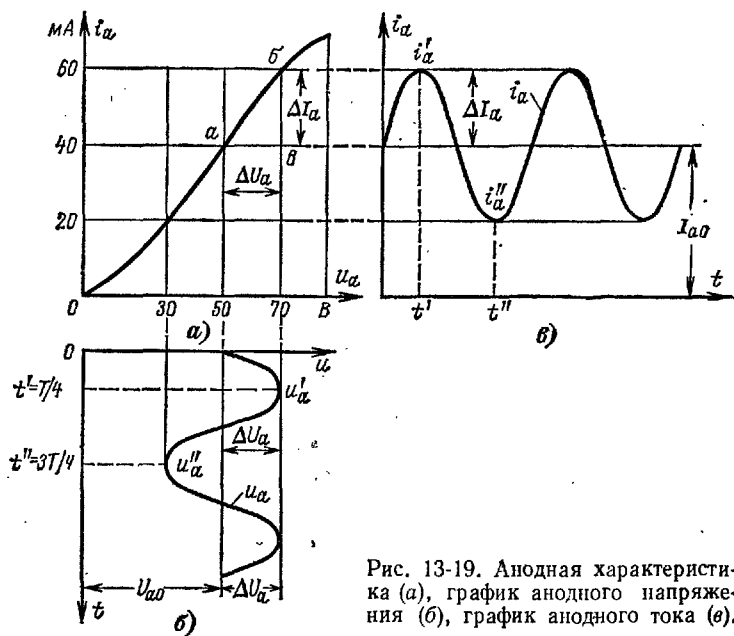


Рис. 13-19. Анодная характеристика (а), график анодного напряжения (б), график анодного тока (в).

ним сопротивлением диода при переменном токе, т. е.

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}. \quad (13-15)$$

Дифференциальное сопротивление диода на разных участках характеристики имеет разные значения. Однако средняя часть характеристики диода почти прямолинейна, и поэтому на этой части ее дифференциальное сопротивление практически постоянно. Оно часто и применяется для характеристики лампы.

Из рис. 13-19 постоянная составляющая анодного напряжения $U_{a0} = 50$ В, а соответствующая ей постоянная со-

ставляющая анодного тока $I_{a0} = 40$ мА, следовательно, статическое сопротивление диода

$$R_0 = U_{a0}/I_{a0} = 50/40 \cdot 10^{-3} = 1,25 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 1,25 \text{ кОм}.$$

Из того же рис. 13-19 амплитуда переменной составляющей анодного напряжения $\Delta U_a = 20$ В, а соответствующая ей амплитуда переменной составляющей анодного тока $\Delta I_a = 20$ мА, следовательно, дифференциальное сопротивление диода

$$R_i = \Delta U_a / \Delta I_a = 20/20 \cdot 10^{-3} = 10^3 \text{ Ом} = 1 \text{ кОм}.$$

Статическое сопротивление диода R_0 всегда больше его дифференциального сопротивления R_i .

Отношение приращения анодного тока ΔI_a к соответствующему приращению анодного напряжения ΔU_a (рис. 13-18) называется к р у т и з н о й х а р а к т е р и с т и к и

$$S = \Delta I_a / \Delta U_a. \quad (13-16)$$

Анодный ток измеряется в амперах или миллиамперах, а анодное напряжение — в вольтах, поэтому сопротивление измеряется в вольтах на ампер (В/А), а крутизна, как величина, обратная сопротивлению, в амперах на вольт (А/В) или (мА/В).

Крутизну характеристики можно рассматривать как дифференциальную или внутреннюю проводимость диода при переменном токе, следовательно, если известно дифференциальное сопротивление диода, то тем самым известна и дифференциальная проводимость, таким образом, крутизна не является независимым параметром диода.

Вследствие нелинейности анодной характеристики диода крутизна характеристики, так же как и дифференциальное сопротивление диода, на различных участках характеристики не одинакова.

Для нахождения крутизны по данной характеристике диода выбирают участок ее ab (рис. 13-18), находят для него приращения ΔI_a (отрезок be) и ΔU_a (отрезок ae) и, определяя их отношение, получают крутизну для участка ab или для средней точки g этого участка. Иногда пользуются понятием максимальной крутизны, соответствующей прямолинейной части характеристики.

Падая на анод, электроны отдают ему свою кинетическую энергию $mv^2/2$, которая выделяется в виде тепла. Если мощность P_a , полученная анодом, превосходит мощность,

которую анод отдает в окружающее пространство, то температура анода повышается. Это может вызвать перегрев, деформацию анода и разрушение катода, находящегося вблизи анода.

Электрон на пути от катода к аноду приобретает энергию $mv^2/2 = eU_a$. Если на анод падает n электронов в секунду, то энергия, получаемая анодом за это время, т. е. мощность анода,

$$P_a = nmv^2/2 = neU_a = I_a U_a. \quad (13-17)$$

В рабочем режиме вследствие нагрева анода возможно выделение из него остатков газа. Для уменьшения газовыделения анодом его при изготовлении лампы в процессе откачки газа (воздуха) интенсивно прогревают. При работе лампы температура анода должна быть меньше, чем при откачке, и меньше температуры катода во избежание перегрева катода. Допустимая температура нагрева анода определяет величину допустимой мощности, передаваемой аноду электронным потоком.

Мощность P_a , развиваемая на аноде при работе лампы, должна быть меньше допустимой:

$$P_a = I_a U_a < P_{a, \text{доп}} = I_{a, \text{доп}} U_a,$$

а допустимая величина анодного тока

$$I_{a, \text{доп}} = P_{a, \text{доп}} / U_a. \quad (13-18)$$

Аноды электронных ламп изготавливаются из никеля, молибдена, тантала или графита.

Для увеличения мощности, рассеиваемой анодом, применяют аноды с добавочными ребрами или радиаторами. Применяется также чернение анода и покрытие его цирконием для повышения лучеиспускания и для поглощения остаточных газов.

Для каждой лампы указывается *предельное значение выделяемой на аноде мощности* $P_{a, \text{доп}}$, при которой температура анода не превышает допустимой.

Если приложить отрицательное (обратное) анодное напряжение, превышающее запирающее, то может развиваться самостоятельный электрический разряд и наступить пробой. Для каждой лампы указывается *наибольшее допустимое обратное напряжение* $U_{\text{обр. доп}}$. К параметрам лампы относятся также *номинальное напряжение* (U_n) и *номинальный ток* (I_n) *накала лампы*.

в) Типы и система обозначений диодов

По назначению двухэлектродные лампы делятся на *кенотроны* и *высокочастотные диоды*.

Кенотроном называется двухэлектродная лампа, предназначенная для выпрямления переменного тока промышленной частоты, т. е. для преобразования переменного тока в постоянный ток.

Высокочастотным диодом называется двухэлектродная лампа, предназначенная для преобразования высокочастотных колебаний (детектирование, модулирование, преобразование частоты).

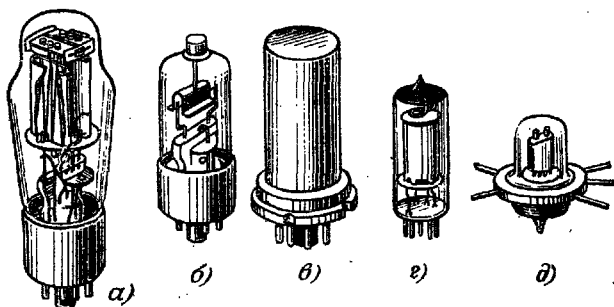


Рис. 13-20. Оформление электронных ламп.

а — двуханодный низковольтный кенотрон в стеклянном баллоне; б — высоковольтный кенотрон с верхним выводом анода, в стеклянном баллоне; в — лампа в металлическом баллоне; г — миниатюрная пальчиковая лампа; д — лампа типа «желудь».

По конструкции диоды бывают *одноанодными* и *двуханодными*. Двуханодный диод, как показывает название, представляет собой сочетание двух одинаковых диодов в одном баллоне. Такой диод может иметь один общий или два изолированных катода.

Размеры баллона лампы зависят от ее мощности, так как чем больше мощность лампы, тем больше тепла излучают электроды. Для ограничения температуры баллона увеличивают его поверхность.

По габаритным размерам, кроме обычных стеклянных и металлических ламп, снабженных цоколем, различают широко применяемые *миниатюрные* — *пальчиковые* и лампы типа «желудь» (рис. 13-20), которые не имеют цоколя. У последних выводы от электродов выполняются гибкими проводами, которые припаиваются к соответствующим точкам схемы, или выводы от электродов выполняются из

более толстых проводов, которые в то же время служат штырьками для соединения с гнездами ламповой панели.

Некоторые нормальные стеклянные и металлические лампы имеют восьмиштырьковый (октальный) цоколь. В цоколе по периферии симметрично укреплены восемь металлических штырьков, соединенных с электродами лампы, а в центре расположен пластмассовый удлиненный штырь-ключ с выступом (рис. 13-21, а), обеспечивающим правильную установку лампы. Штырьки цоколя вставляются в ламповую панельку (рис. 13-21, б). Штырьки нумеруются

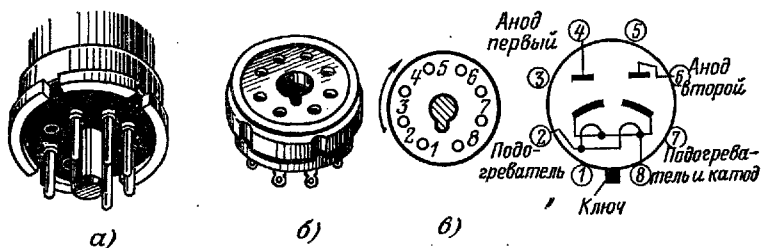


Рис. 13-21. Октальный цоколь (а); ламповая панель (б); нумерация штырьков (в); цоколевка кенотрона 5Ц4С (г).

от выступа ключа по часовой стрелке (рис. 13-21, в). Часть штырьков у некоторых ламп отсутствует.

Схема соединения электродов лампы со штырьками называется ц о к о л е в к о й л а м п ы. Она обычно приводится в справочниках по электровакуумным приборам.

Система обозначений электровакуумных приборов установлена ГОСТ 13393-67. Согласно этому стандарту обозначение электронной лампы состоит из четырех элементов:

1-й элемент обозначения — число, указывающее округленно напряжение накала в вольтах.

2-й элемент обозначения — буква, указывающая тип лампы:

Д — диод;

Х — двойной диод;

Ц — кенотрон.

3-й элемент обозначения — число, указывающее порядковый номер данного типа прибора.

4-й элемент обозначения — буква, указывающая конструктивное оформление:

С — в стеклянной оболочке, диаметром больше 22,5 мм;

К — в керамической оболочке;

- П — стеклянная, миниатюрная, диаметром 19 и 22,5 мм;
- Г — стеклянная сверхминиатюрная, диаметром свыше 10,2 мм;
- Б — стеклянная сверхминиатюрная, диаметром до 10,2 мм;
- А — стеклянная сверхминиатюрная, диаметром до 8 мм;
- Р — стеклянная сверхминиатюрная, диаметром не более 5 мм;
- Н — металлокерамическая.

Отсутствие четвертого элемента обозначения указывает, что лампа имеет металлическую оболочку.

В качестве примера рассмотрим условные обозначения нескольких электронных ламп:

5Ц4С — кенотрон (Ц), напряжение накала 5 В (5), в стеклянной колбе нормальных размеров (С), тип № 4 (4).

6Д6А — высокочастотный диод (Д), напряжение накала 6,3 В (6), сверхминиатюрный в стеклянной колбе диаметром до 8 мм (А), тип № 6 (6).

6Х6С — двойной диод (Х), напряжение накала 6,3 В (6), в стеклянной колбе нормальных размеров (С), тип № 6 (6).

13-7. Применение двухэлектродных ламп

а) Однополупериодное выпрямление переменного тока

Выпрямление переменного тока, т. е. преобразование его в постоянный (пульсирующий) ток, производится при помощи устройств, которые обладают весьма малым сопротивлением в прямом направлении и очень большим сопротивлением в обратном направлении. Устройства, обладающие таким свойством, называются *электрическими вентилями*. К ним относятся, в частности, рассмотренные двухэлектродные лампы.

На рис. 13-22 показана вольт-амперная характеристика идеального вентиля, сопротивление которого в прямом направлении R_v равно нулю, а в обратном $R_{обр}$ — равно бесконечности. Вольт-амперная характеристика идеального вентиля представляет собой отрезок Oa — положительной полуоси тока и отрезок Ob — отрицательной полуоси напряжения (обратное напряжение). На рис. 13-23, а дана приближенная кусочно-линейная аппроксимация вольт-амперной характеристики диода (отрезками bo и Oa). Этой характеристике соответствует схема замещения, состоящая

из идеального вентиля и последовательно соединенного его прямого сопротивления R_v (рис. 13-23, б).

При включении идеального вентиля ($R_v = 0$), соединенного последовательно с резистором (нагрузкой) R_n

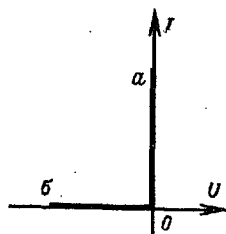


Рис. 13-22. Вольт-амперная характеристика идеального вентиля.

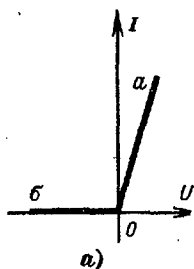
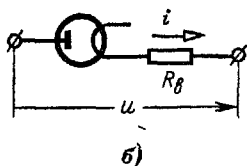


Рис. 13-23. Вольт-амперная характеристика вентиля (а) и его схема замещения (б).



(рис. 13-24, а) на синусоидальное напряжение $u = U_m \times \sin \omega t$ в течение положительного полупериода ($u > 0$), ток в цепи (рис. 13-24, б) определяется выражением

$$i = \frac{u}{R_v + R_n} = \frac{u}{R_n} = \frac{U_m \sin \omega t}{R_n} = I_m \sin \omega t. \quad (13-19)$$

В течение отрицательного полупериода напряжения $u < 0$ ток в цепи не проходит, так как обратное сопротивление лампы равно бесконечности, т. е.

$$i = \frac{u}{R_{обп} + R_n} = \frac{u}{\infty} = 0. \quad (13-19a)$$

Следовательно, в цепи в течение периода проходит одна полуволна синусоидального тока (рис. 13-24, б).

В течение положительного полупериода напряжение на нагрузке равно напряжению, приложенному к цепи $iR_n = u_n = u$, а напряжение на вентиле равно нулю, так как его сопротивление $R_v = 0$ (рис. 13-24, в). В течение отрицательного полупериода напряжение на нагрузке равно нулю (рис. 27, б), так как ток в цепи $i = 0$, а напряжение на вентиле (рис. 13-24, в) равно напряжению и на зажимах цепи. Из сказанного следует, что кривая напряжения на нагрузке подобна кривой тока. Как видно из графика, напряжение на нагрузке u_n и ток в цепи вентиля i являются пульсирующими.

При рассмотрении явлений в электрических цепях с несинусоидальными, и в частности пульсирующими, напряжениями и токами обычно пользуются теоремой Фурье. Согласно этой теореме периодически изменяющаяся величина может рассматриваться как сумма некоторой постоянной (независимой от времени) величины и ряда синусоидальных величин, имеющих разные амплитуды, частоты и начальные фазы.

Синусоидальная величина, имеющая ту же частоту, что и заданная несинусоидальная величина, называется о с

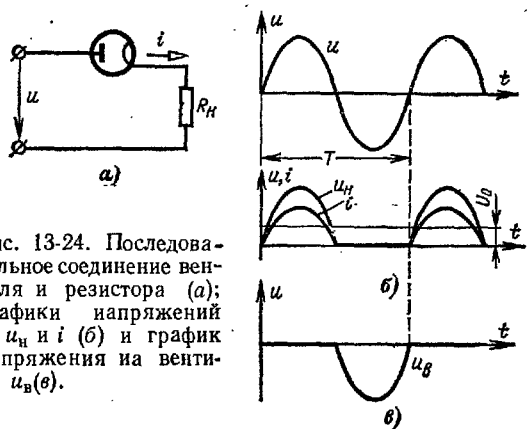


Рис. 13-24. Последовательное соединение вентили и резистора (а); графики напряжений u , u_n и i (б) и график напряжения на вентиле u_g (в).

новной или первой синусоидой, а график ее — первой гармоникой. Синусоидальная величина, имеющая двойную частоту, — второй синусоидой (второй гармоникой) и т. д.

В результате разложения в ряд Фурье однополупериодного выпрямленного тока получим:

$$i = \frac{I_m}{\pi} + \frac{I_m}{2} \sin \omega t - \frac{2I_m}{3\pi} \cos 2\omega t - \frac{2I_m}{3 \cdot 5\pi} \cos 4\omega t - \dots$$

$$\dots = I_0 + I_{1m} \sin \omega t - I_{2m} \cos 2\omega t - I_{4m} \cos 4\omega t - \dots \quad (13-20)$$

Из приведенного ряда следует, что он содержит постоянную составляющую

$$I_0 = I_m/\pi, \quad (13-21)$$

первую (основную) гармонику тока, имеющую амплитуду $I_{1m} = I_m/2$ и частоту f , равную частоте подведенного к цепи напряжения, и все четные гармоники с частотами $2f$, $4f$ и т. д.

Действующее значение тока в той же цепи можно выразить, пользуясь общим определением действующего значения тока (5-10):

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T/2} I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = I_m/2. \quad (13-22)$$

Действующее значение напряжения на зажимах цепи

$$U = U_m/\sqrt{2}.$$

Постоянная составляющая напряжения на нагрузке, или, что то же, выпрямленное напряжение на нагрузке

$$U_0 = I_0 R_n = R_n I_m/\pi = U_m/\pi = U\sqrt{2}/\pi = 0,45U. \quad (13-23)$$

Уравнение (13-23) позволяет определить действующее значение переменного напряжения на зажимах цепи по заданному значению выпрямленного напряжения U_0 .

Максимальное значение обратного напряжения вентиля (рис. 13-24, в) равно амплитуде напряжения на зажимах цепи:

$$U_{\text{обр. макс}} = U_m. \quad (13-24)$$

Активная мощность цепи

$$P = I^2 R_n = \frac{I_m^2}{4} R_n = U_m I_m/4. \quad (13-25)$$

Полная мощность цепи

$$S = UI = (U_m/\sqrt{2})(I_m/2) = U_m I_m/2\sqrt{2}. \quad (13-26)$$

Активная мощность цепи при однополупериодном выпрямлении составляет 0,707 ($1/\sqrt{2}$) полной мощности цепи вследствие того, что выпрямленный ток проходит по цепи только в течение одного полупериода и, следовательно, источник, питающий цепь, используется не полностью.

Степень или величину пульсаций тока или напряжения оценивают коэффициентом пульсаций q , под которым понимают отношение амплитуды наиболее резко выраженной (первой) гармоники тока (или напряжения) к постоянной составляющей тока (или напряжения), таким образом,

$$q = \frac{I_{1m}}{I_0} \quad \text{или} \quad q = \frac{U_{1m}}{U_0}. \quad (13-27)$$

Для однополупериодного выпрямителя коэффициент пульсаций

$$q = \frac{I_{1m}}{I_0} = \frac{I_m/2}{I_m/\pi} = \frac{\pi}{2} = 1,57. \quad (13-27a)$$

Большим недостатком однополупериодного выпрямления являются пульсации тока и напряжения на нагрузке, т. е. большие переменные составляющие тока и напряжения на нагрузке. Для уменьшения этих пульсаций применяются сглаживающие фильтры.

Пример 13-1. Определить переменное напряжение, которое надо подвести к цепи однополупериодного выпрямителя (рис. 13-24) для того, чтобы получить выпрямленное напряжение $U = 225$ В.

Согласно (13-23) напряжение питания

$$U = U_0 / 0,45 = 225 / 0,45 = 500 \text{ В.}$$

б) Двухполупериодное выпрямление переменного тока

Двухполупериодные схемы выпрямления применяются чаще однополупериодных, так как они обеспечивают лучшее использование источника питания (трансформатора) и уменьшение пульсаций тока и напряжения на нагрузке.

На рис. 13-25, а дана одна из возможных схем двухполупериодного выпрямления — схема с выведенной средней точкой вторичной обмотки трансформатора.

К концам 1 и 2 вторичной обмотки трансформатора присоединены аноды двойного диода, а катод его через активную нагрузку R_H присоединен к средней точке вторичной обмотки трансформатора.

В течение первого полупериода потенциал точки 1 выше потенциала средней точки 0 и ток проходит через первый вентиль и нагрузку. В течение второго полупериода потенциал точки 2 выше потенциала точки 0 и ток проходит через второй вентиль и нагрузку. Таким образом, в нагрузке в течение периода проходят

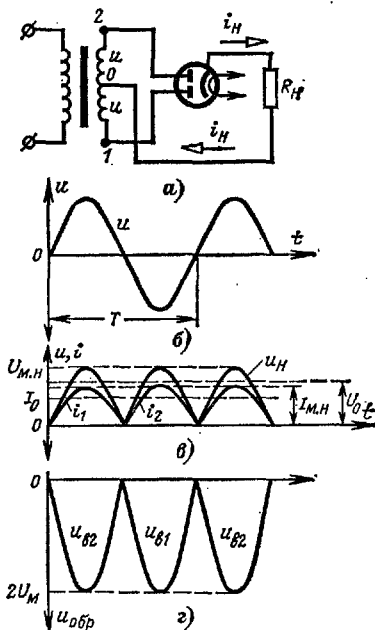


Рис. 13-25. Двухполупериодный выпрямитель.

а — схема; б — график питающего напряжения; в — графики напряжения и тока на нагрузке; г — график обратного напряжения.

две полуволны тока одного направления (рис. 13-23, а и в). Следовательно, постоянная составляющая тока в нагрузке в 2 раза больше, чем в однополупериодной схеме (рис. 13-21), т. е.

$$I_0 = 2I_m/\pi, \quad (13-28)$$

а действующее значение тока в нагрузке

$$I = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} i^2 dt} = I_m/\sqrt{2}.$$

Постоянная составляющая напряжения на нагрузке

$$U_0 = I_0 R_n = \frac{2I_m R_n}{\pi} = \frac{2}{\pi} U_m = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U = 0,9U, \quad (13-29)$$

т. е. оно в 2 раза больше, чем при однополупериодном выпрямлении (13-23).

В первый полупериод открыт первый клапан и, поскольку, прямое сопротивление его равно нулю ($R_b = 0$), то напряжение на нагрузке равно напряжению на половине вторичной обмотки трансформатора $u_n = u$. В этот же полупериод ко второму закрытому клапану приложено отрицательное напряжение, равное сумме напряжения на половине вторичной обмотки трансформатора и напряжения нагрузки $u_{в2} = u + u_n = 2u$. Следовательно, максимальное обратное напряжение двухполупериодного выпрямителя равно удвоенной амплитуде напряжения обмотки, т. е.

$$U_{обр. макс} = 2U_m = 2\sqrt{2}U = 2\sqrt{2} \frac{\pi}{2\sqrt{2}} U_0 = \pi U_0. \quad (13-30)$$

Активная мощность цепи

$$P = I^2 R_n = I_m^2 R_n / 2 = U_m I_m / 2 = UI = S. \quad (13-31)$$

Следовательно, при двухполупериодном выпрямлении активная мощность равна полной мощности.

Для выпрямителей за исключением однополупериодного коэффициент пульсаций может быть найден в зависимости от числа фаз m выпрямителя по формуле

$$q = \frac{2}{m^2 - 1}, \quad (13-32)$$

причем двухполупериодный выпрямитель рассматривается как двухфазный со сдвигом фаз в половину периода ($T/2$).

Применяя (13-32) для двухполупериодного выпрямителя, получим:

$$q = \frac{2}{2^2 - 1} = \frac{2}{3} = 0,667.$$

Недостатками рассматриваемой схемы являются большое максимальное обратное напряжение и плохое использование вторичной обмотки трансформатора, обусловленное тем, что по каждой половине обмотки ток проходит только в течение половины периода.

Рассмотренные двухполупериодные выпрямители применяются для питания ламп в радиоприемниках, телевизо-

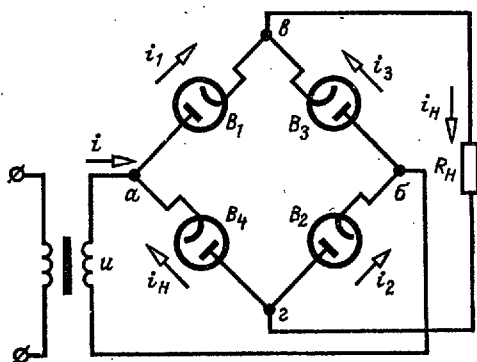


Рис. 13-26. Мостовая схема двухполупериодного выпрямителя.

рах и электронных усилителях и генераторах небольшой мощности.

На рис. 13-26 дана мостовая схема двухполупериодного выпрямителя.

В каждое плечо моста включен вентиль (диод). К диагонали ab приложено синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$, а к другой диагонали $вг$ присоединена активная нагрузка R_n . В положительный полупериод, когда потенциал точки a выше потенциала точки $б$, т. е. при $u > 0$, вентили B_1 и B_2 открыты, сопротивления их $R_{в1} = R_{в2} = 0$, а вентили B_3 и B_4 заперты, так как к каждому из них приложено отрицательное напряжение, по величине равное напряжению источника питания u . Таким образом, в первый полупериод ток

$$i = \frac{u}{2R_{в1} + R_n} = \frac{u}{R_n} = \frac{U_n \sin \omega t}{R_n} = I_m \sin \omega t$$

от источника питания проходит через вентиль B_1 , сопротивление нагрузки R_n и вентиль B_2 . В следующий полупериод при $u < 0$ вентили B_3 и B_4 открыты, а вентили B_1 и B_2 закрыты. Теперь ток от источника питания идет через вентиль B_3 , сопротивление нагрузки R_n и четвертый вентиль B_4 .

Таким образом, в нагрузке в течение периода проходят две полуволны тока одного направления, а напряжение на зажимах нагрузки представляет собой две полуволны одного знака. Следовательно, как и в предыдущем случае двухполупериодного выпрямления, постоянная составляющая тока в нагрузке (13-28)

$$I_0 = 2I_m/\pi,$$

а постоянная составляющая напряжения на нагрузке

$$U_0 = I_0 R_n = 2U_m/\pi = 0,9U. \quad (13-33)$$

В отличие от предыдущего случая двухполупериодного выпрямления максимальное значение обратного напряжения на вентилях равно амплитуде напряжения на зажимах цепи, т. е.

$$U_{\text{обр. макс}} = U_m. \quad (13-34)$$

Из преимуществ мостовой схемы отметим: в 2 раза меньшее по сравнению с предыдущей схемой обратное напряжение; лучшее использование трансформатора, так как ток во вторичной обмотке его проходит в течение всего периода; наконец, возможность применения схемы без трансформатора.

Из недостатков укажем на необходимость иметь четыре вентиля, т. е. в 2 раза больше, чем в предыдущей схеме.

Мостовая схема обычно применяется для полупроводниковых вентилях, а некоторые двухполупериодные выпрямители чаще выполняются по схеме с выведенной средней точкой вторичной обмотки трансформатора.

Пример 13-2. Выпрямитель собран по мостовой схеме из вентилях с обратным напряжением $U_{\text{обр. макс}} = 350$ В. Определить допустимое действующее значение напряжения U питания цепи выпрямителя и значение выпрямленного напряжения U_0 .

Решение. Согласно (13-34) $U_{\text{обр. макс}} = U_m$, следовательно, действующее значение напряжения питания цепи выпрямителя

$$U = U_m/\sqrt{2} = 350/1,41 \approx 248 \text{ В.}$$

Согласно (13-33) выпрямленное напряжение

$$U_0 = 0,9U = 0,9 \cdot 248 = 223 \text{ В.}$$

в) Трехфазные выпрямители

На рис. 13-27, а дана одна из возможных схем трехфазного выпрямителя.

К началам вторичных обмоток ABC трехфазного трансформатора присоединены аноды трех вентилей, а катоды их соединены в узел O' . Между нулевыми точками $O—O'$ включена активная нагрузка R_H .

Через каждый из вентилей проходит ток только в одну треть периода, в течение которого напряжение на фазе трансформатора, в которую включен вентиль, выше напряжения двух других фаз. На рис. 13-27, б напряжение на нагрузке

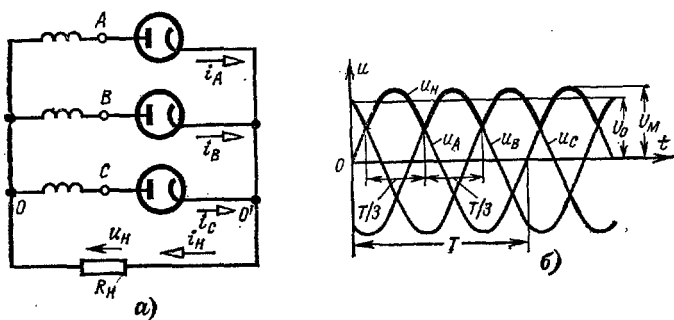


Рис. 13-27. Трехфазный выпрямитель.

а — схема; б — графики фазных напряжений.

изображено толстой линией, образованной участками синусоид фазных напряжений. В ту треть периода, когда открыт один вентиль, два других вентиля закрыты и их сопротивления равны бесконечности. Поэтому образуется последовательная цепь фаза трансформатора — открытый вентиль — нагрузка. При идеальном вентиле и активной нагрузке ток в цепи $i = u/R_H$, а напряжение на нагрузке равно фазному напряжению $u = u_H = iR_H$, так что кривая, образованная участками графиков фазных напряжений и проведенная на рис. 13-27, б жирной линией, в то же время является кривой напряжения на нагрузке u_H . Та же кривая, но в другом масштабе, будет изображать и кривую тока в нагрузке. Таким образом, если в двухполупериодном выпрямителе напряжение и ток изменялись от нуля до амплитудных значений, то в трехфазном выпрямителе пульсации тока и напряжения на нагрузке значительно меньше.

Для определения среднего значения выпрямленного напряжения, изображенного средней ординатой кривой напря-

жения u , найдем площадь, ограниченную этой кривой, ординатами для моментов времени $T/12$ и $5T/12$, осью абсцисс, и разделим ее на основание, т. е. на $T/3$. Таким образом, выпрямленное напряжение на нагрузке

$$U_0 = \frac{1}{T/3} \int_{T/12}^{5T/12} U_m \sin \omega t dt = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} U_m = 0,827 U_m = 1,17 U. \quad (13-35)$$

Среднее значение выпрямленного тока в нагрузке

$$I_0 = \frac{U_0}{R_n} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \frac{U_m}{R_n} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi 2} I_m = 0,827 I_m. \quad (13-36)$$

Так как ток в вентиле проходит только в течение одной третьей части периода, то, естественно, среднее значение его в 3 раза меньше тока в нагрузке, т. е.

$$I_B = I_0/3. \quad (13-37)$$

Из (13-36) можно написать выражение максимальных значений токов во вторичных обмотках трансформатора или равные им максимальные значения токов в вентиллях:

$$I_m = I_{B, \text{м}} = \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} I_0 = 1,16 I_0; \quad (13-38)$$

приняв во внимание (13-38), окончательно напишем:

$$I_m = I_{B, \text{м}} = 1,16 I_0 = 3,48 I_B. \quad (13-38a)$$

Из (13-35) максимальное значение обратного напряжения равно амплитуде линейного напряжения, т. е.

$$U_{\text{обр. макс}} = \sqrt{3} U_m = \sqrt{3} \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} U_0 = \frac{2\pi}{3} U_0 = 2,09 U_0.$$

Коэффициент пульсаций в этом случае

$$q = \frac{2}{3^2 - 1} = 0,25.$$

г) Электрические фильтры

Выпрямленное напряжение (ток) состоит из постоянной и переменной составляющих.

В большинстве случаев приемниками энергии постоянного тока используется только постоянная составляющая напряжения (тока). Переменные составляющие напряжения обычно не только не используются, но, более того, приводят

к потерям энергии, вызывая уменьшение к. п. д. механизмов и устройств, а иногда сопровождаются и другими нежелательными явлениями.

Поэтому стремятся к уменьшению переменной составляющей, представляющей собой пульсации напряжения. Уменьшение пульсаций достигается применением сглаживающих фильтров, которые включаются между выходными зажимами выпрямителя и входными зажимами нагрузки.

Отношение коэффициента пульсаций на входных зажимах фильтра к коэффициенту пульсаций на выходных

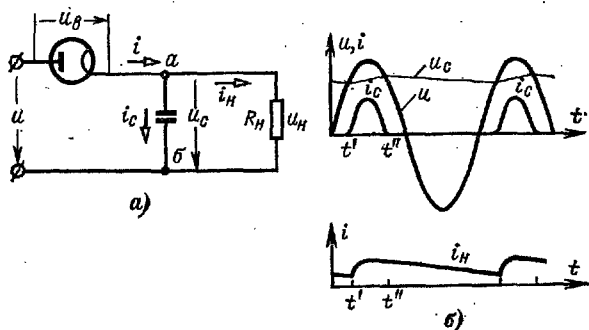


Рис. 13-28. Емкостный фильтр в цепи выпрямителя.

а — схема; б — графики напряжений и токов.

зажимах фильтра называется коэффициентом сглаживания пульсаций, т. е.

$$S = \frac{q_{вх}}{q_{вых}}. \quad (13-39)$$

Таким образом, коэффициент сглаживания показывает, во сколько раз фильтр уменьшает пульсации.

Для уменьшения пульсаций применяются фильтры: емкостные, индуктивные и индуктивно-емкостные.

Емкостный фильтр представляет собой конденсатор емкостью C , включаемый параллельно нагрузке R_n (рис. 13-28, а).

Напряжение на вентиле u_v равно разности напряжения источника питания u и напряжения на конденсаторе u_c , т. е. $u_v = u - u_c$. Ток через вентиль проходит только тогда, когда $u - u_c > 0$. Следовательно, с момента t' (рис. 13-28, б), в который $u - u_c = 0$, конденсатор начнет заряжаться и через вентиль будет проходить зарядный ток i_c и ток нагрузки i_n , т. е. $i_v = i_c + i_n$.

Заряд конденсатора прекратится в момент t'' , когда снова $u - u_C = 0$. С этого момента напряжение u становится меньше, чем u_C , и конденсатор начнет разряжаться на нагрузку R_H . При этом напряжение на конденсаторе уменьшается по закону

$$u_C = U_{C0} e^{-t/\tau},$$

где U_{C0} — напряжение на конденсаторе при заперении вентиля в момент t'' ;

$\tau = CR_H$ — постоянная времени или время, за которое напряжение u_C уменьшается в $e = 2,72$ раза.

При $\tau \gg T$ напряжение u_C уменьшается медленно и незначительно до следующего открытия вентиля. За то же время разрядный ток конденсатора он же ток нагрузки ($i_C = i_H$) также изменяется мало. Затем процесс начнет повторяться. Таким образом, напряжение на нагрузке $u_H = u_C$ выравнивается так же, как и ток в нагрузке $i_H = u_H/R_H$.

В течение отрицательного полупериода напряжение источника питания суммируется с напряжением нагрузки, так что максимальное обратное напряжение диода

$$U_{\text{обр. макс}} = 2U_m. \quad (13-40)$$

Емкостный фильтр широко применяется для выпрямителей малой мощности.

И н д у к т и в н ы й ф и л ь т р (рис. 13-29) представляет собой реактивную катушку (дроссель), обладающую индуктивностью L (индуктивное сопротивление $x_L = \omega L$) и активным сопротивлением R_ϕ , которая включается последовательно с сопротивлением нагрузки R_H .

Индуктивный фильтр работает эффективно в цепях с большими токами при выполнении условий $m\omega L \gg R_H$ и $R_\phi \ll R_H$. В этом случае постоянная составляющая напряжения на входных зажимах фильтра мало отличается от постоянной составляющей напряжения на выходных зажимах фильтра, так как

$$\frac{U_{0\text{вх}}}{U_{0\text{вых}}} = \frac{I_0(R_\phi + R_H)}{I_0 R_H} \approx \frac{R_H}{R_H} = 1.$$

Для большего сглаживания применяются Г - о б р а з н ы е ф и л ь т р ы (рис. 13-30, а), состоящие из двух эле-

ментов: индуктивности L_Φ , включенной последовательно с разветвлением из нагрузки R_H , и емкости C_Φ . Повышение сглаживания здесь происходит потому, что в индуктивности теряется значительная часть переменной составляющей напряжения и, следовательно, на разветвлении переменная составляющая напряжения будет значительно меньшей. Емкость, включенная параллельно нагрузке, представляет для переменной составляющей тока сопротивление, значительно меньшее, чем сопротивление R_H , и поэтому значительно уменьшает долю этого тока в нагрузке.

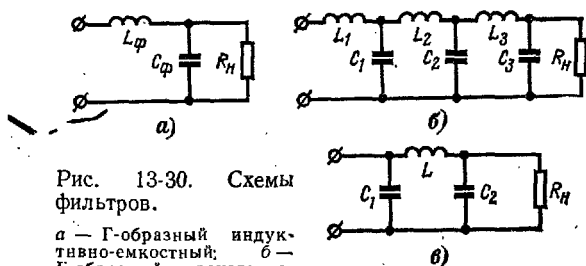


Рис. 13-30. Схемы фильтров.

а — Г-образный индуктивно-емкостный; б — Г-образный трехзвеньевой LC-фильтр; в — П-образный LC-фильтр.

Если коэффициент сглаживания, полученный при помощи одного Г-образного фильтра, недостаточен, то применяют фильтры, состоящие из двух или трех Г-образных звеньев (три катушки индуктивности L_1 , L_2 и L_3 и три конденсатора C_1 , C_2 и C_3) (рис. 13-30, б). В этом случае результирующий коэффициент сглаживания равен произведению коэффициентов сглаживания всех звеньев фильтра, т. е.

$$S = S_1 S_2 S_3. \quad (13-41)$$

Наряду с Г-образными фильтрами для кенотронных и полупроводниковых (но не для ионных) выпрямителей широко применяются П-образные фильтры.

П-образный фильтр (рис. 13-30, в) представляет собой сочетание емкостного и Г-образного индукционно-емкостного фильтра и состоит из двух конденсаторов C_1 и C_2 и катушки индуктивности L .

Коэффициент сглаживания П-образного фильтра больше, чем Г-образного. Он равен произведению коэффициентов сглаживания емкостного фильтра (S_{C_1}) и Г-образного фильтра (S_r), т. е.

$$S = S_{C_1} S_r. \quad (13-42)$$

Трехэлектродные лампы.**Четырех- и пятиэлектродные лампы.****Усилители****14-1. Устройство и принцип работы триода**

Трехэлектродная электронная лампа — триод отличается от диода наличием третьего электрода — управляющей сетки. Назначение сетки — управлять электронным потоком лампы, т. е. ее током. Этот электрод в ранних конструкциях выполнялся в виде сетки, откуда и произошло название второй части

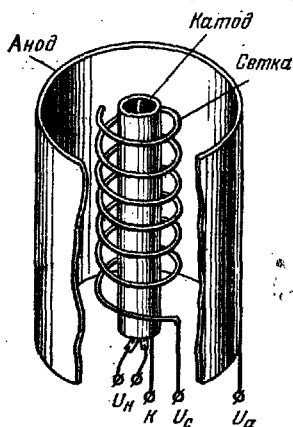


Рис. 14-1. Схема устройства триода.

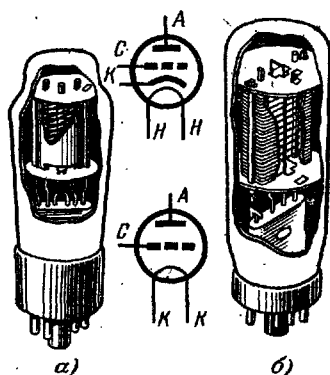


Рис. 14-2. Устройство триодов с катодами косвенного (а) и прямого (б) накала и их условные обозначения.

этого электрода — сетка. В большинстве современных ламп этот электрод выполняется в виде проволоочной спирали из вольфрама, никеля, молибдена или их сплавов. Сетка располагается вблизи катода (рис. 14-1) в пространстве между анодом и катодом. Витки сетки укрепляются при помощи держателей.

Катоды, так же как у диодов, применяются прямого накала или подогревные. Устройство триодов и их условные обозначения на схемах даны на рис. 14-2.

Свойство сетки управлять анодным током триода позволило применить их для создания электронных усилителей, электронных генераторов, реле и т. д.

При соединении триода для работы создаются три цепи (рис. 14-3): цепь накала, цепь анода и цепь сетки, причем общая точка O двух последних цепей соединяется с катодом лампы. Этой общей точке O приписывается нулевой потенциал, и относительно нее определяются потенциалы остальных точек схемы.

Разность потенциалов между сеткой и катодом называется сеточным напряжением.

Если в диоде на электроны, вылетающие из раскаленного катода, действуют объемный заряд и электрическое поле, созданное одним анодным напряжением U_a , то в триоде электрическое поле между анодом и катодом создается не только анодным, но и сеточным напряжением U_c . При этом действие сеточного напряжения является более сильным, так как сетка расположена ближе к катоду, и, кроме того, она ослабляет влияние анодного напряжения, действуя как экран в электрическом поле анода.

Ради упрощения, как и выше (§ 13-6, а), будем считать, что анод и катод представляют собой плоские параллельные пластины, а плоская сетка расположена параллельно пластинам, ближе к катоду.

Если сетка не присоединена к источнику напряжения, то при наличии одного анодного напряжения электрическое поле будет однородным и распределение потенциала между пластинами будет линейным (рис. 14-4, а). При этом сетка будет иметь потенциал, равный потенциалу точек поля, в которых она находится, так что не окажет влияния на поле лампы.

Соединив сетку с катодом, сообщим ей нулевой потенциал, отчего потенциалы точек поля между катодом и анодом понизятся (рис. 14-4, б). Напряженность поля между катодом и сеткой уменьшится, т. е. уменьшится плотность линий напряженности поля (рис. 14-4, б) и график распределения потенциалов пойдет ниже. Один график дан для плоскости, проходящей через сечение витка сетки 1, 1, другой для плоскости, проведенной между витками на одинаковом расстоянии от витков (2, 2).

Сообщив сетке отрицательный потенциал ($U_c < 0$), получим понижение потенциалов точек поля в пространстве,

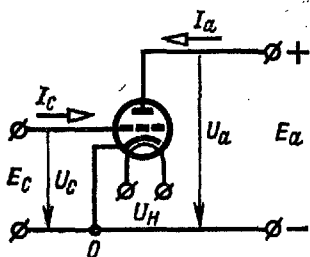


Рис. 14-3. Схема включения триода.

окружающем сетку. На ускоряющее поле, созданное анодным напряжением, между катодом и сеткой наложится тормозящее поле сетки, так что результирующее поле при неизменном анодном напряжении U_a будет зависеть от величины отрицательного напряжения на сетке U_c . При небольшом отрицательном напряжении U_c результирующее поле будет еще ускоряющим, между катодом и анодом будет проходить анодный ток I_a . При некотором большем отрицательном напряжении, называемом *запирающим напряжением* $U_c = U_{c, \text{зап}}$, результирующее поле между ка-

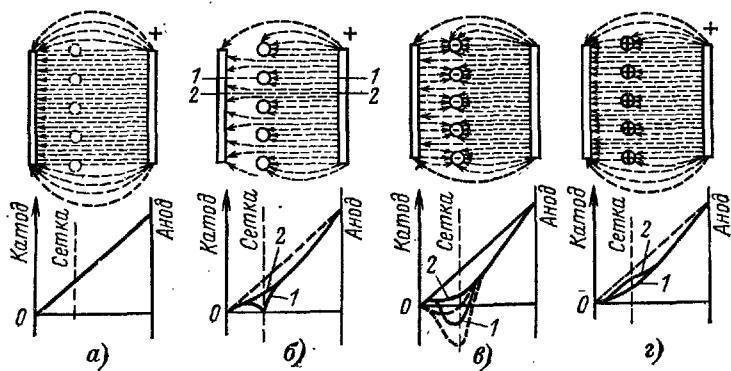


Рис. 14-4. Электрическое поле в триоде и распределение потенциалов в пространстве между катодом и анодом.

а — при отсоединенной сетке; б — при сетке, соединенной с катодом ($\varphi_c = 0$); в — при сетке, имеющей отрицательный потенциал ($\varphi_c < 0$); г — при сетке, имеющей положительный потенциал ($\varphi_c > 0$).

тодом и сеткой становится тормозящим — лампа запирается и анодный ток не проходит. Картина поля и распределение потенциалов для этого случая показаны на рис. 14-4, в.

При положительном напряжении на сетке $U_c > 0$ на ускоряющее поле, созданное анодным напряжением, накладывается ускоряющее поле сетки, и между сеткой и катодом напряженность поля увеличивается, плотность линий напряженности становится больше (рис. 14-4, г), потенциалы точек в этой части поля повышаются и графики распределения потенциала располагаются выше. Естественно, при этом возрастают анодный и сеточный токи лампы.

Из сказанного следует, что изменение сеточного напряжения, мало влияющего на электрическое поле между сеткой и анодом, наоборот, очень сильно влияет на поле между

сеткой и катодом, на объемный заряд и на величину анодного тока. Таким образом, влияние сеточного напряжения на анодный ток значительно превышает влияние анодного напряжения.

При появлении в цепи сетки слабых электрических сигналов или колебаний любой формы и частоты, в анодной цепи и в нагрузке, включенной в эту цепь, возникают подобные же электрические сигналы или колебания только большей мощности. Рассмотренные явления составляют сущность принципа работы триода как усилителя.

14-2. Статические характеристики триода

В предыдущем параграфе было показано, что при неизменном напряжении накала анодный ток в триоде зависит от анодного и сеточного напряжений. Поэтому представляют интерес два вида характеристик триода:

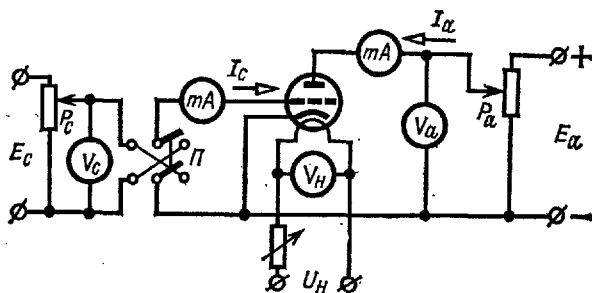


Рис. 14-5. Схема для снятия статических характеристик триода.

1. Анодная характеристика, представляющая собой зависимость анодного тока от анодного напряжения при неизменном сеточном напряжении, т. е. $I_a = f(U_a)$ при $U_c = \text{const}$.

2. Анодно-сеточная характеристика, представляющая зависимость анодного тока от сеточного напряжения при неизменном анодном напряжении, т. е. $I_a = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$.

Характеристики триода, которые снимаются при медленных изменениях напряжений и токов, называются статическими.

Схема соединений для снятия статических характеристик триода приведена на рис. 14-5.

Цепь накала триода питается от источника постоянного тока или от понижающей обмотки трансформатора. Напряжение накала устанавливается и поддерживается номинальным при помощи реостата и контролируется вольтметром. Анодная цепь питается от источника постоянного тока E_a . Анодное напряжение устанавливается и регулируется при помощи трехконтактного реостата P_a и измеряется вольтметром V_a . Измерение анодного тока производится миллиамперметром mA . Цепь сетки питается от источника постоянного тока E_c . Установка и регулировка напряжения производится трехконтактным реостатом P_c . Измерение сеточного напряжения и тока производится вольтметром V_c и миллиамперметром mA . Двухполюсный переключатель позволяет менять знак напряжения, подводимого к сетке.

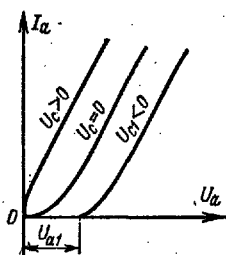


Рис. 14-6. Анодные характеристики триода при различных сеточных напряжениях.

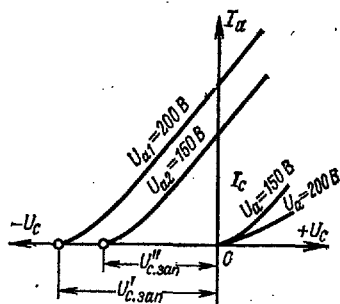


Рис. 14-7. Анодно-сеточные характеристики триода и графики сеточных токов.

Анодную характеристику триода снимают, установив номинальное напряжение накала и определенное требуемое сеточное напряжение, которые поддерживают неизменным. Увеличивая от нуля анодное напряжение через одинаковые интервалы, замечают (записывают) значения анодного тока и соответствующие им значения напряжения. По полученным данным строят характеристику, откладывая по оси ординат анодный ток, а по оси абсцисс анодное напряжение.

Анодная характеристика триода при нулевом значении сеточного напряжения практически не отличается от анодной характеристики диода, начинаясь от нуля координат (рис. 14-6).

Если снять анодную характеристику при неизменном отрицательном сеточном напряжении U_{c1} , то она, сохраняя форму и наклон, расположится вправо от первой снятой при $U_c = 0$, т. е. расположится в области более высоких анодных напряжений. Это происходит потому, что при небольших анодных напряжениях лампа заперта отрицательным сеточным напряжением и отпирается только тогда, когда анодное напряжение достигнет определенного положительного значения U_{a1} , при котором тормозящее поле

сетки будет полностью компенсировано ускоряющим анодным полем. Если анодную характеристику снять при еще большем отрицательном сеточном напряжении, то отпирание произойдет при еще большем анодном напряжении. При положительном напряжении на сетке характеристика расположится левее и тем выше, чем больше величина сеточного напряжения. Совокупность анодных характеристик, полученных при различных значениях сеточного напряжения, называется семейством анодных характеристик.

Анодно-сеточную характеристику триода (рис. 14-7) снимают, установив номинальное напряжение накала, определенное требуемое анодное напряжение и максимальное отрицательное сеточное напряжение. После этого постепенно уменьшают сеточное напряжение до нуля, замечая (записывая) при различных значениях сеточного напряжения соответствующие им значения анодного тока. Затем, изменив (переключателем Π , рис. 14-5), знак сеточного напряжения, снимают часть характеристики, соответствующую положительным значениям сеточного напряжения. Аналогично снимают характеристики и при других значениях анодного напряжения. Начальная точка анодно-сеточной характеристики соответствует тому значению сеточного напряжения, при котором ускоряющее поле, созданное анодным напряжением между катодом и сеткой, полностью компенсирует тормозящее поле, созданное отрицательным сеточным напряжением. При этом, естественно, чем выше анодное напряжение, при котором снимается анодно-сеточная характеристика, тем с большего значения отрицательного сеточного напряжения она начинается. Уменьшение сеточного напряжения вызывает увеличение ускоряющего поля между сеткой и катодом и, следовательно, увеличение анодного тока.

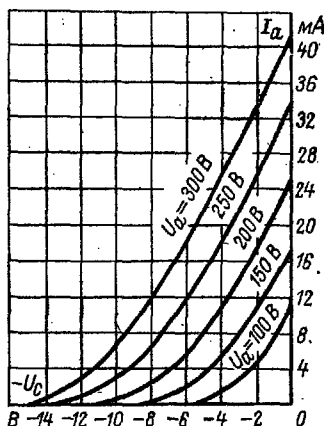


Рис. 14-8. Семейство анодно-сеточных характеристик триода.

При положительном напряжении на сетке появляется сеточный ток. Две сеточные характеристики $I_c = f(U_c)$ показаны на рис. 14-7. Сеточный ток при увеличении анодного напряжения уменьшается, так как при увеличении анодного напряжения ускоряющее поле у сетки становится сильнее и перехватывает электроны, находящиеся у поверхности сетки, уменьшая этим возможный сеточный ток.

На рис. 14-8 показан ряд анодно-сеточных характеристик триода, снятых при различных значениях анодного напряжения, т. е. семейство анодно-сеточных характеристик.

Если лампа имеет редкую сетку, то запирающее напряжение ее велико и большая часть ее анодно-сеточной характеристики располагается влево от оси ординат. Такие характеристики называются левыми (рис. 14-8). Если лампа имеет густую сетку, то запирающее напряжение ее невелико и большая часть характеристики располагается вправо от оси ординат. Такие характеристики называются правыми.

14-3. Параметры триода

П а р а м е т р а м и т р и о д а называются постоянные величины, устанавливающие связь между изменением анодного тока и изменениями напряжения на аноде и на сетке, т. е. величины, характеризующие основные свойства лампы.

Основными параметрами триода являются: крутизна характеристики S , внутреннее сопротивление при переменном токе R_i и коэффициент усиления μ .

Крутизной анодно-сеточной характеристики триода или просто крутизной называется отношение приращения анодного тока ΔI_a (рис. 14-9) к вызвавшему его приращению сеточного напряжения ΔU_c при неизменном напряжении, т. е.

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \quad \text{при } U_a = \text{const.} \quad (14-1)$$

На анодно-сеточной характеристике (рис. 14-9) показано, что изменение сеточного напряжения на величину $\Delta U_c = U_c'' - U_c'$ вызывает изменение анодного тока на величину $\Delta I_a = I_a'' - I_a'$.

Крутизна численно равна изменению анодного тока, выраженного в миллиамперах, при изменении сеточного напряжения на один вольт при неизменном анодном напряжении.

Крутизна различна для различных участков характеристики. На восходящем участке она больше, чем на на-

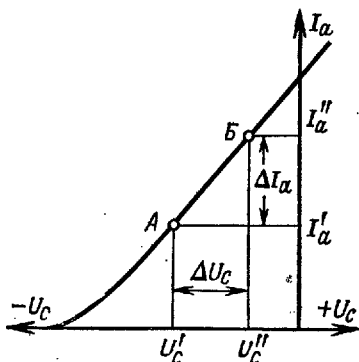


Рис. 14-9. К определению крутизны анодно-сеточной характеристики.

вызавшему его приращению сеточного напряжения ΔU_c при неизменном напряжении, т. е.

чальном. У различных типов триодов крутизна на восходящих участках имеет значения от 1 до 40 мА/В.

Таким образом, крутизна анодно-сеточной характеристики характеризует свойство сетки управлять анодным током триода.

Внутренним сопротивлением триода при переменном токе или дифференциальным сопротивлением триода называется отношение приращения анодного напряжения ΔU_a (рис. 14-10) к вызванному им приращению анодного тока ΔI_a при неизменном сеточном напряжении, т. е.

$$R_i = \Delta U_a / \Delta I_a \quad \text{при} \quad U_c = \text{const.} \quad (14-2)$$

На анодной характеристике (рис. 14-10) показано, что изменение анодного напряжения на величину $\Delta U_a = U_a'' - U_a'$ вызывает изменение анодного тока на величину $\Delta I_a = I_a'' - I_a'$.

Если напряжение измеряется в вольтах, ток в миллиамперах, то сопротивление выражается в килоомах.

Внутреннее сопротивление триода характеризует влияние изменения анодного напряжения на изменение анодного тока (чем больше сопротивление, тем меньше это влияние).

Величина внутреннего сопротивления триода различна для различных участков характеристики. На восходящем участке она меньше, чем на начальном, и имеет постоянное значение. Внутреннее сопротивление для различных типов триодов имеет величину от 1 до 100 кОм.

Статическим коэффициентом усиления или просто коэффициентом усиления называется отношение приращений анодного напряжения ΔU_a и сеточного напряжения ΔU_c , которые вызывают одинаковые изменения анодного тока, т. е.

$$\mu = \Delta U_a / \Delta U_c \quad \text{при} \quad \Delta I_a = \text{const.} \quad (14-3)$$

Коэффициент усиления показывает, во сколько раз изменение сеточного напряжения действует на величину анодного тока сильнее изменения анодного напряжения.

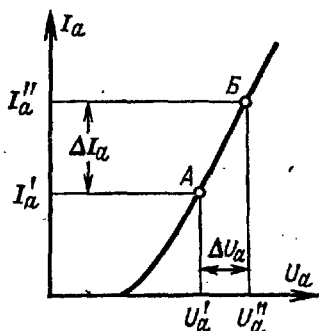


Рис. 14-10. К определению дифференциального сопротивления триода.

Коэффициент усиления является отвлеченным числом. У различных типов триодов он имеет различные значения от нескольких единиц до 100.

Иногда вместо коэффициента усиления применяют величину, обратную коэффициенту усиления и называемую *проницаемостью*.

Проницаемость триода

$$D = \frac{1}{\mu} = \Delta U_c / \Delta U_a \quad \text{при} \quad I_a = \text{const} \quad (14-4)$$

показывает, во сколько раз приращение анодного напряжения действует на ток слабее, чем приращение сеточного напряжения.

Проницаемость характеризует экранирующее действие сетки, показывая, какая часть электрического поля, созданного анодным напряжением, проникает сквозь сетку к катоду лампы. Чем гуще сетка, тем меньше проницаемость и, следовательно, тем больше коэффициент усиления. Наоборот, при редкой сетке проницаемость велика, а коэффициент усиления мал.

Проницаемость также показывает, какую часть анодного напряжения надо прибавить к сеточному напряжению, чтобы триод можно было заменить эквивалентным диодом.

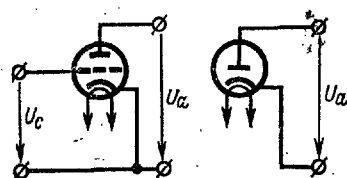


Рис. 14-11. Триод и эквивалентный диод.

В триоде на поток электронов между сеткой и катодом действует суммарное поле, созданное анодным и сеточным напряжением. В некоторых случаях для оценки режима лампы удобнее два электрода триода заменить одним равноценным, который будет создавать у катода поле, одинаковое с указанным суммарным. Таким образом, триод будет

заменен диодом, анодный ток которого равен анодному току триода. Электрод, заменяющий анод и сетку, помещают на место сетки (рис. 14-11).

Напряжение, которое надо приложить между электродами эквивалентного диода для того, чтобы получить тот же анодный ток I_a , что и в триоде, называют *действующим напряжением* U_d . Действующее напряжение должно создавать в области катода электрическое поле такой же напряженности, как и напряженность поля, создаваемая в триоде напряжениями U_a и U_c . Умножив анодное напряжение на проницаемость ($U_a D$), получим ту долю анодного напряжения триода, которая, действуя между электродами эквивалентного анода, создаст в области катода такую же слагающую электрического поля, как и анодное напряжение в триоде.

Таким образом, действующее напряжение эквивалентного диода

$$U_d = U_c + D U_a. \quad (14-5)$$

Произведение трех параметров триода S , R_i и D равно единице:

$$SR_iD = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \frac{\Delta U_c}{\Delta U_a} = 1. \quad (14-6)$$

Написанное уравнение, связывающее между собой три параметра триода, называется **внутренним уравнением триода**.

Заменив в последнем уравнении проницаемость D величиной $1/\mu$, получим другую форму внутреннего уравнения триода

$$\mu = SR_i. \quad (14-7)$$

Естественно, уравнение (14-7) дает возможность по двум известным параметрам определить третий.

Иногда пользуются вспомогательным параметром, называемым **добротностью**.

Добротность триода характеризует лампу в отношении максимальной мощности, получаемой от нее на нагрузке при амплитуде колебаний напряжения на сетке в 1 В.

Добротность определяется как произведение коэффициента усиления и крутизны характеристики, т. е.

$$G = \mu S, \text{ мВт/В}^2. \quad (14-8)$$

Главные параметры триода при заданном режиме (U_a , I_a , U_c) можно определить графически, воспользовавшись семейством статических анодных или анодно-сеточных характеристик, снятых экспериментально по схеме рис. 14-5 или взятых из справочника по электровакуумным приборам.

Для определения параметров по анодным характеристикам (рис. 14-12), снятым при сеточных напряжениях U_c и U'_c , строят **характеристический треугольник АБВ**. При этом точка A соответствует выбранному режиму, определяемому значениями U_a и I_a .

Проведя из точки A линию, параллельную оси абсцисс, до пересечения со второй анодной характеристикой получим вторую вершину треугольника B . Проведя через точку B ординату до пересечения с первой анодной характеристикой, получим третью вершину треугольника B . Катетами этого треугольника являются приращение анодного тока ΔI_a и приращение анодного напряжения ΔU_a . Приращение сеточного напряжения определяется как разность

известных сеточных напряжений $\Delta U_c = U_c'' - U_c'$, при которых снимались характеристики. Подставляя полученные значения приращений ΔI_a и ΔU_a и ΔU_c по формулам

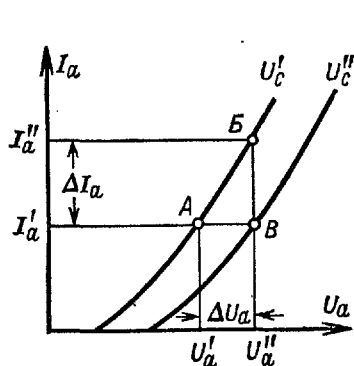


Рис. 14-12. Определение параметров триода по анодным характеристикам.

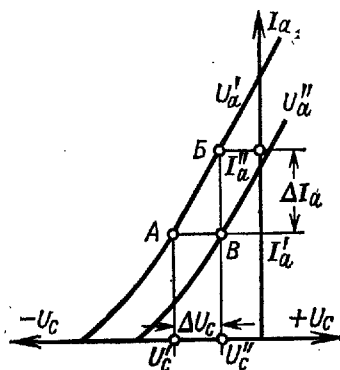


Рис. 14-13. Определение параметров триода по анодно-сеточным характеристикам.

(14-1)—(14-4), определяют параметры триода S , R_i и μ или D .

Аналогично строится характеристический треугольник ABV на двух анодно-сеточных характеристиках лампы

(рис. 14-13). Катетами этого треугольника являются приращения ΔU_c и ΔI_a . Приращение анодного напряжения в этом случае определяется как разность анодных напряжений $\Delta U_a = U_a' - U_a''$, при которых снимались характеристики.

Пример 14-1. Определить параметры S , R_i , μ , D и G триода 6С5С, пользуясь характеристическим треугольником ABV (рис. 14-14).

Решение.

1. Крутизна характеристики

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} = \frac{24 - 12}{8 - 4} = \frac{12}{4} = 3 \text{ mA/V.}$$

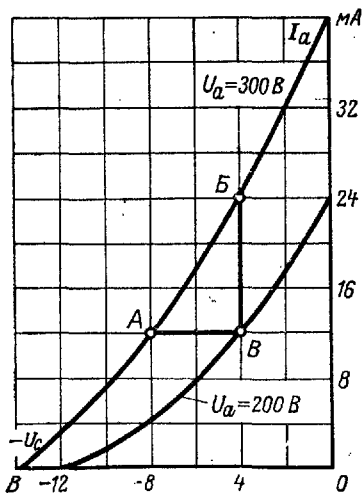


Рис. 14-14. К примеру 14-1.

2. Внутреннее сопротивление триода

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{300 - 200}{12} = \frac{100}{12} = 8,33 \text{ кОм.}$$

3. Коэффициент усиления триода

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} = \frac{300 - 200}{8 - 4} = \frac{100}{4} = 25.$$

4. Проницаемость триода

$$D = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{25} = 0,04.$$

5. Добротность

$$G = \mu S = 25 \cdot 3 = 75 \text{ мВт/В}^2.$$

14-4. Простейший каскад усиления

В предыдущих параграфах рассматривался режим работы триода без нагрузки, характерный тем, что анодное и сеточное напряжения триода изменялись независимо друг от друга.

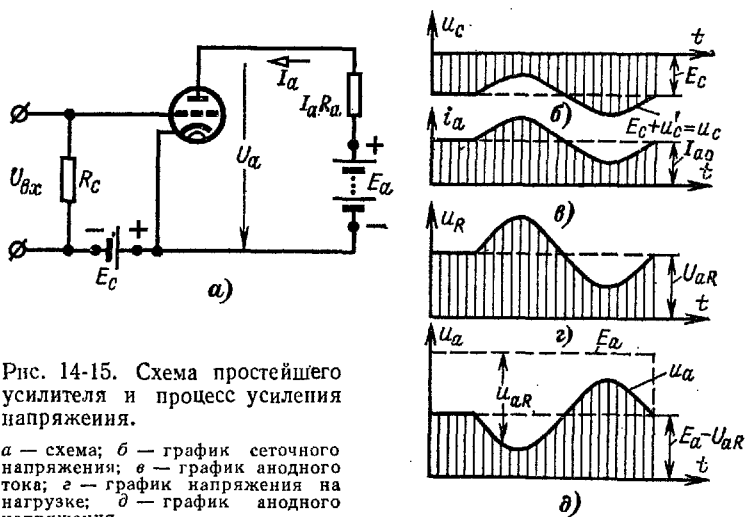


Рис. 14-15. Схема простейшего усилителя и процесс усиления напряжения.

a — схема; *б* — график сеточного напряжения; *в* — график анодного тока; *г* — график напряжения на нагрузке; *д* — график анодного напряжения.

При практическом использовании триода в его анодную цепь включают *нагрузочное сопротивление* R_a (приемник электрических колебаний).

На рис. 14-15, *a* показано включение триода для работы в схеме простейшего усилителя. В анодной цепи лампы включены нагрузочное сопротивление R_a и источник пи-

тания анодная батарея E_a . Сеточная цепь сетка — катод состоит из резистора R_c , внешнего источника переменного напряжения $U_{вх}$, подлежащего усилению, и батареи сеточного смещения с э. д. с. E_c .

Сопротивление R_c называемое *сопротивлением утечки*, предназначено для того, чтобы электроны, попавшие на сетку, могли стекать с нее в цепь источника анодного питания.

Рассмотрим процесс усиления переменного входного напряжения $u_{вх}$. Включим анодную батарею E_a и отрицательное сеточное напряжение $-E_c$ (рис. 14-15, б), которое обеспечивает работу усилителя без сеточного тока. При отсутствии входного напряжения получим в анодной цепи некоторый постоянный ток — ток покоя I_{a0} (рис. 14-15, в), зависящий от сопротивления R_a и э. д. с. E_a и E_c . При появлении на входных зажимах переменного напряжения $u_{вх} = u_c$ (рис. 14-15) результирующее напряжение на сетке u_c будет состоять из двух составляющих u'_c и E_c . В положительный полупериод результирующее напряжение достигнет минимума, определенного суммой $U_{c,м} + (-E_c) = U_{c,мин}$, а в отрицательный полупериод это напряжение достигнет отрицательного максимума, определяемого суммой $-U_{c,м} + (-E_c) = -U_{c,м}$.

Весьма незначительные изменения результирующего сеточного напряжения u'_c вызывают достаточно большие изменения анодного тока, который при уменьшении отрицательного сеточного напряжения в первый полупериод увеличивается, а при увеличении отрицательного напряжения на сетке во второй полупериод уменьшается (рис. 14-15, в). Таким образом, постоянный анодный ток под воздействием незначительного переменного сеточного напряжения u_c становится пульсирующим, содержащим большую переменную составляющую.

Анодный ток, проходя по сопротивлению R_a , создает в нем падение напряжения (рис. 14-15, г):

$$u_R = i_a R_a = I_{a0} R_a + i'_a R_a = U_{aR} + u'_{aR}. \quad (14-9)$$

Анодное напряжение u_a равно разности постоянной э. д. с. E_a и падения напряжения в сопротивлении R_a , т. е.

$$u_a = E_a - u_R = E_a - (U_{aR} + u'_{aR}) = (E_a - U_{aR}) - u'_a. \quad (14-10)$$

На рис. 14-15, д показаны графики E_a , $(E_a - U_{aR})$ и u_a .

Переменная составляющая анодного напряжения $(-u'_a)$ является выходным напряжением $u_{вых}$, представляющим собой усиленное сеточное (входное) напряжение $u_{вх}$. При от-

сутствии искажений кривая выходного напряжения повторяет кривую входного напряжения. Таким образом, сущность процесса усиления заключается в том, что при затрате весьма малой мощности переменного тока в цепи сетки в анодной цепи получают электрические колебания большой мощности.

Следует обратить внимание на то, что анодный ток i_a и напряжение на активной нагрузке u_{aR} изменяются в фазе с напряжением на сетке u_c , а анодное напряжение u_a , или, что то же, напряжение на выходе $u_{\text{вых}}$, изменяются в противофазе с напряжением u_c (рис. 14-51). Таким образом, *усилитель (усилительный каскад) с активной нагрузкой изменяет фазу напряжения на $T/2$, или на 180° .*

14-5. Характеристики и параметры простейшего каскада усиления

Для анодной цепи (рис. 14-15, а) можно написать:

$$E_a - U_a = I_a R_a,$$

откуда анодный ток

$$I_a = \frac{E_a - U_a}{R_a} = \frac{E_a}{R_a} - \frac{1}{R_a} U_a. \quad (14-11)$$

Зависимость анодного тока от анодного напряжения можно представить графически прямой, называемой *нагрузочной прямой*.

Ее можно построить по двум точкам. Из (14-11) следует, что при $I_a = 0$ (лампа заперта) анодное напряжение равно э. д. с. анодного источника $U_a = E_a$. Откладывая на оси абсцисс напряжение $U_a = E_a$, получим одну точку (Б) характеристики (рис. 14-16). Приравняв нулю анодное напряжение из (14-11), получим $I_a = E_a/R_a$. Откладывая на оси ординат найденное значение тока, получим вторую точку (В) характеристики. Прямая, соединяющая точки Б и В, представляет собой нагрузочную прямую, т. е. $I_a = f(U_a)$ при $E_a = \text{const}$ и $R_a = \text{const}$.

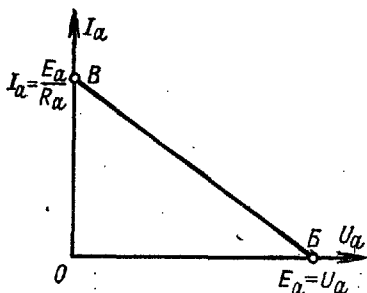


Рис. 14-16. Анодная динамическая характеристика — нагрузочная прямая.

Зависимость анодного тока от сеточного напряжения при наличии постоянного нагрузочного сопротивления R_a в анодной цепи триода и при неизменной э. д. с. E_a , т. е. $I_a = f(U_c)$ при $E_a = \text{const}$ и $R_a = \text{const}$, называется а н о д -

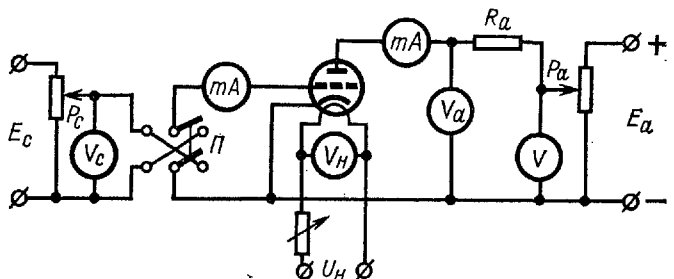


Рис. 14-17. Схема соединения для снятия характеристик простейшего каскада на триоде.

но - сеточной характеристикой каскада.

Схема соединения для снятия характеристик каскада (рис. 14-17) отличается от схемы рис. 14-5 для снятия статических характеристик лампы только тем, что в анодной цепи включено сопротивление нагрузки (R_a).

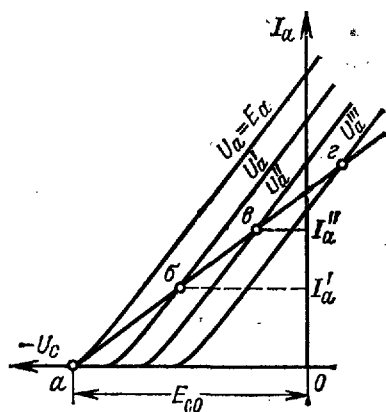


Рис. 14-18. Анодно-сеточная (рабочая) характеристика каскада.

анодный ток равен нулю $I_a = 0$, естественно, равно нулю и падение напряжения на нагрузке ($I_a R_a = 0$), и анодное напряжение равно э. д. с. источника $U_a = E_a$. Точка а (рис. 14-18) является общей начальной точкой для характеристик лампы и каскада. При увеличении сеточ-

Установив номинальное напряжение накала при постоянных значениях R_a и E_a изменяют сеточное напряжение и при различных значениях его записывают сеточное напряжение и анодный ток.

По полученным данным строится характеристика.

На рис. 14-18 показана анодно-сеточная характеристика (абвг) и статические анодно-сеточные характеристики триода.

При сеточном напряжении, равном напряжению запирающего $E_{c0} = U_{c.з.}$, анод-

ного напряжения появляется анодный ток. Если бы анодного сопротивления R_a не было, то анодный ток изменялся бы по статической характеристике лампы, снятой при $U_a = E_a$. Наличие анодного сопротивления R_a обуславливает падение напряжения на нем $I_a R_a$, а анодное напряжение триода уменьшается до $U'_a = E_a - I_a R_a$. Следовательно, значению тока I_a должна соответствовать ордината характеристик каскада и лампы (точка б), снятой при анодном напряжении U'_a . При дальнейшем уменьшении сеточного напряжения анодный ток увеличивается, соответственно увеличивается и падение напряжения на сопротивлении R_a . Анодное напряжение триода U_a при этом уменьшается, принимая по очереди значения $U''_a = E_a - I''_a R_a$; $U'''_a = E_a - I'''_a R_a$ и т. д. При анодном напряжении U''_a току I'' соответствует точка в, принадлежащая этим характеристикам, при напряжении U'''_a току I''' соответствует точка г и т. д.

Таким образом, при уменьшении отрицательного сеточного напряжения анодное напряжение уменьшается, а анодный ток изменяется по характеристике *абвг*, расположенной более полого, чем статические характеристики лампы. Крутизна анодно-сеточной характеристики каскада S_k всегда меньше крутизны статической характеристики S и зависит от сопротивления нагрузки. Она определяется выражением

$$S_k = S \frac{R_i}{R_i + R_a}.$$

Анодно-сеточную характеристику каскада можно построить по семейству статических анодных характеристик и нагрузочной прямой рис. 14-19, а. Точки пересечения характеристик с указанной прямой определяют значения анодных токов при различных сеточных напряжениях. Перенеся в другую систему координат сеточные напряжения и соответствующие им анодные токи, получим характеристику каскада (рис. 14-19, б).

Величина анодного тока при отсутствии входного напряжения определяется на характеристике каскада положением *рабочей точки покоя* (А).

Положение рабочей точки зависит от сеточного напряжения $U_{c0} = E_c$, которое называется *напряжением смещения*. Она выбирается так, чтобы рабочая точка была на середине линейного участка динамической характеристики.

На рис. 14-19, б показано напряжение смещения U_{c0} и входное переменное напряжение $u_{вх} = U_{вх.м} \sin \omega t$, подлежащее усилению (кривая $abed$). Анодный ток лампы, изменяющийся в соответствии с этим напряжением, изображен на рис. 14-19, б кривой $a'b'e'z'd'$, построенной по кривой сеточного напряжения и характеристике каскада. Анодный ток, проходя по анодной цепи, создает на нагрузочном сопротивлении падение напряжения $u_{вых} = i_a R_a$,

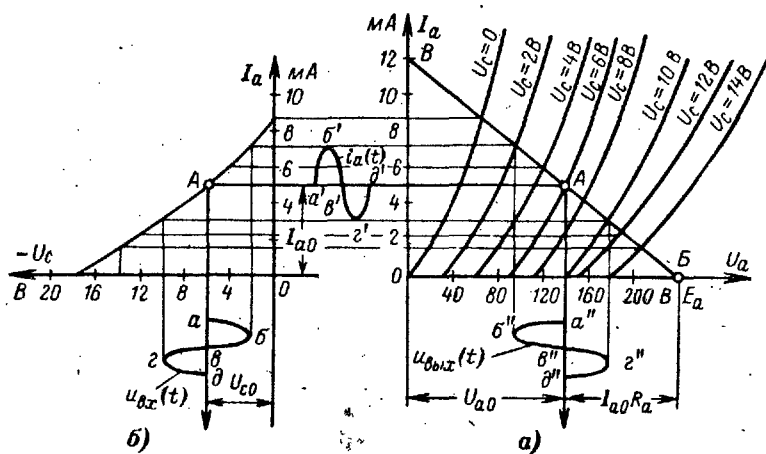


Рис. 14-19. Построение характеристики каскада.

которое является выходным напряжением усилителя. Это напряжение на рис. 14-19, а изображено кривой $a''b''e''z''d''$ и построено по кривой анодного тока и нагрузочной прямой.

Отношение амплитуды выходного напряжения к амплитуде входного напряжения называется коэффициентом усиления каскада:

$$\mu_k = \frac{U_{м.вх}}{U_{м.вх}}. \quad (14-12)$$

Для того чтобы установить связь между статическим и коэффициентом усиления лампы и коэффициентом усиления каскада, заменим схему усилителя (рис. 14-15) эквивалентной схемой (рис. 14-20), в которой триод заменен генератором переменного напряжения с внутренним сопротивлением R_i и амплитудой напряжения $\mu U_{м.вх}$.

Если генератор замкнут на сопротивление нагрузки R_a , то по закону Ома амплитуда тока в цепи

$$I_{a, м} = \frac{\mu U_{м. вх}}{R_i + R_a}, \quad (14-13)$$

а амплитуда напряжения на сопротивлении нагрузки, т. е. амплитуда выходного напряжения

$$U_{м. вых} = I_{a, м} R_a = \mu U_{м. вх} \frac{R_a}{R_i + R_a}.$$

Коэффициент усиления каскада

$$\mu_k = \frac{U_{мR}}{U_{м. вх}} = \mu \frac{R_a}{R_i + R_a}. \quad (14-12a)$$

Так как $R_a < (R_a + R_i)$, то коэффициент усиления каскада всегда меньше статического коэффициента усиления лампы.

Пример 14-2. В усилительной схеме (рис. 14-15) применен триод с параметрами $S = 4,4$ мА/В и $\mu = 76$. Сопротивления в схеме $R_c = 1$ МОм и $R_a = 100$ кОм. Определить коэффициент усиления схемы. Из (14-7) внутреннее сопротивление триода

$$R_i = \frac{\mu}{S} = \frac{76}{4,4} = 17,3 \text{ кОм.}$$

Из уравнения (14-12a) коэффициент усиления каскада

$$\mu_k = \mu \frac{R_a}{R_a + R_i} = 76 \frac{100}{100 + 17,3} \approx 65.$$

В схемах усилителей смещение на сетке часто задается не источником напряжения $E_{с0}$ (рис. 14-15), а за счет падения напряжения на сопротивлении R_k , включенном в цепь катода (рис. 14-21). Постоянная составляющая анодного тока I_{a0} , проходя по этому сопротивлению, создает падение напряжения $U_{см} = -I_{a0} R_k$. Таким образом, потенциал сетки автоматически понижается относительно катода на величину $U_{см}$ (автоматическое сеточное смещение).

Переменная составляющая анодного тока замыкается через блокировочный конденсатор C_k , включенный параллельно сопротивлению R_k . Сопротивление конденсатора должно быть мало по сравнению с сопротивлением R_k , с тем чтобы падение напряжения, созданное переменной составляющей анодного тока в сопротивлении R_k , было достаточно мало и не влияло на сеточное напряжение.

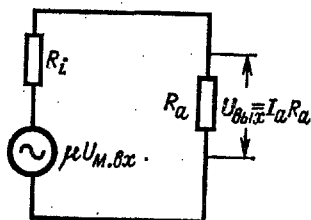


Рис. 14-20. Эквивалентная схема триода в режиме усилителя напряжения.

Обычно напряжение смещения $U_{см}$ составляет несколько вольт, сопротивление R_K — от 50 до 1500 Ом, а емкость определяется из соотношения

$$C_K \geq 20/(R_K \omega_{н}), \quad (14-14)$$

где $\omega_{н}$ — низшая частота переменной составляющей тока.

При высокой частоте на работу триода влияют его *междуэлектродные емкости*, обусловленные наличием металлических электродов. Триод имеет три такие емкости (рис. 14-22): входную емкость

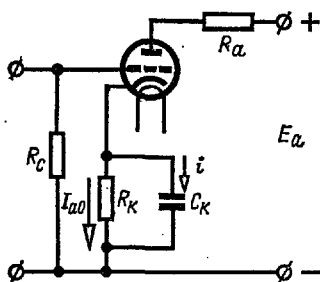


Рис. 14-21. Автоматическое сеточное смещение.

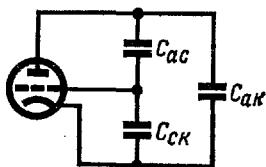


Рис. 14-22. Междуэлектродные емкости триода.

сетка — катод $C_{ск}$, выходную емкость анод — катод $C_{ак}$ и проходную емкость анод — сетка $C_{ас}$.

Величина этих емкостей зависит от размеров, формы электродов и расстояний между ними. Обычно эти емкости имеют небольшую величину от единиц до десятков пикофарад. При низких частотах сопротивления их велики и их влияние на работу ничтожно.

При высоких частотах емкость $C_{ск}$, шунтирующая сопротивление R_c , и емкость $C_{ас}$, шунтирующая сопротивление анодной нагрузки R_a , уменьшают коэффициент усиления усилителя. Наконец, из-за емкости $C_{ас}$ часть переменной составляющей выходного напряжения, воздействуя на вход усилителя, искажает усиливаемое напряжение, чем мешает работе усилителя. Это последнее явление называется *паразитной обратной связью*.

14-6. Типы триодов

Триоды по своему назначению делятся на **усилительные**, предназначенные для усиления напряжения и для усиления мощности, и **генераторные** — для генерирования электрических колебаний.

Триоды для усиления напряжения имеют сравнительно большой коэффициент усиления $\mu = 30 \div 100$, сравнительно большое внутреннее сопротивление $R_i = 50 \div 100$ кОм и небольшую крутизну характеристики $S = 1 \div 2$ мА/В.

Триоды для усиления мощности имеют малый коэффициент усиления $\mu = 3 \div 10$, небольшое внутреннее сопротивление $R_i = 1 \div 10$ кОм и большую крутизну характеристики $S = 2 \div 6,5$ мА/В.

По конструкции триоды делятся на одинарные и двойные, у которых в одном баллоне укрепляются вертикально две трехэлектродные системы.

На триоды распространяется ГОСТ 13393-67 (§ 13-6, в), согласно которому вторым элементом, обозначающим тип лампы, для триодов служат буква С — триод и буква Н — двойной триод.

В отношении баллонов и габаритных размеров ламп классификация остается той же, что и в § 13-6, в.

На рис. 14-23 даны условные обозначения двойных триодов.

Основные достоинства триодов — простота устройства и надежность в работе и большой прямолинейный участок анодно-сеточной характеристики.

Основные недостатки триода — малый коэффициент усиления и большая проходная емкость C_{ac} , делающая невозможным применение их на высокой частоте.

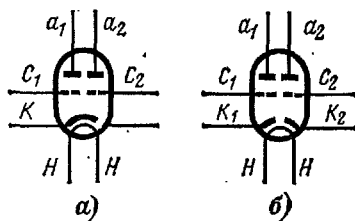


Рис. 14-23. Двойные триоды.

а — с общим катодом; б — с разделенными катодами.

14-7. Четырехэлектродные лампы — тетроды

а) Устройство и работа тетрода

Одним из главных недостатков триода является большая проходная емкость C_{ac} .

Отрицательное влияние этой емкости заключается в том, что сопротивление ее $1/\omega C$ с увеличением частоты уменьшается и под действием переменного напряжения на анодной цепи через эту емкость ответвляется ток в цепь сетки (рис. 14-24). Таким образом, выходное напряжение воздействует обратно на вход лампы, т. е. возникает обратная связь, которая неблагоприятно отражается на работе лампы.

Вторым существенным недостатком триода является малый коэффициент усиления μ . Увеличение коэффициента усиления путем увеличения густоты сетки триода не дает положительных результатов, так как при этом уменьшается запирающее напряжение и анодно-сеточные характеристики триода становятся правыми. В этом случае работа лампы в качестве усилителя делается невозможной из-за сеточных токов.

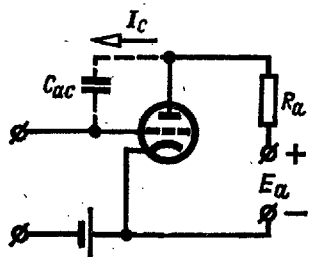


Рис. 14-24. Влияние емкости $C_{ас}$ на работу триода.

Указанные недостатки устраняются применением *экранирующей сетки*, расположенной между анодом и управляющей сеткой.

Такие четырехэлектродные лампы с двумя сетками — экранирующей и управляющей, называются *четырёхэлектродными* или *тетрадами*. (рис. 14-25).

Управляющая сетка в тетраде редкая, т. е. имеет большой шаг намотки спирали, вследствие чего отрицательное запирающее напряжение лампы больше, следовательно, она имеет левые анодно-сеточные характеристики. Экранирующая сетка у тетрода делается частой, т. е. она имеет малый шаг намотки спирали, поэтому она сильно экранирует катод от анодного поля, так что анодное поле получается слабым. Слабым будет и влияние анодного напряжения на величину напряженности электрического поля тетрода, так как основное поле его создается экранирующей сеткой, для чего на нее подается положительное напряжение $U_{с2}$, составляющее обычно более 50% анодного напряжения лампы (рис. 14-26).

Часть электронов, проходя между витками экранирующей сетки, достигает анода, образуя анодный ток. Другая часть их попадает на экранирующую сетку и образует

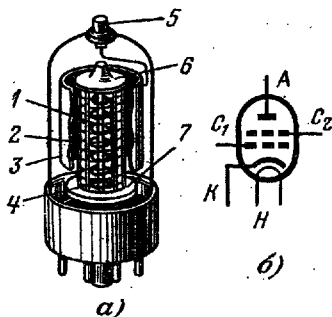


Рис. 14-25. Тетрод.

а — устройство: 1 — управляющая сетка; 2 — экранирующая сетка; 3 — анод; 4 — катод; 5 — вывод анода; 6 — верхний экран; 7 — нижний экран; б — условное обозначение на схемах.

сеточный ток i_{c2} , который должен быть по возможности мал.

Электрическое поле тетрода упрощенно показано на рис. 14-27. Так как экранирующая сетка частая и потенциал ее ниже, чем потенциал анода, то большая часть электрических линий, выходящих из анода, заканчивается на витках экранирующей сетки. Небольшая часть электрических линий анодного поля достигает управляющей сетки и еще меньшая часть — катода.

Уменьшение поля между анодом и управляющей сеткой означает уменьшение емкости C_{ac} между этими электродами в десятки и сотни раз.

Уменьшение напряженности анодного поля вблизи катода приводит к уменьшению влияния анодного напряжения на анодный ток, а влияние потенциала управляющей сетки на анодный ток остается прежним, так как между

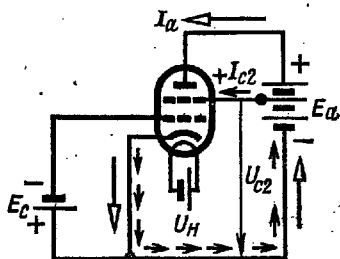


Рис. 14-26. Схема включения тетрода.

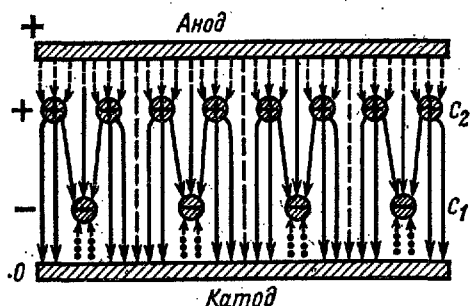


Рис. 14-27. Упрощенная картина электрического поля в тетроде.

управляющей сеткой и катодом нет никаких экранов. Следовательно, коэффициент усиления μ и внутреннее сопротивление R_i у тетрода значительно (на два порядка) больше, чем у триодов, в то время как крутизна характеристики S одинакова.

Анодная характеристика тетрода это зависимость анодного тока от анодного напряжения (рис. 14-28) при постоянных напряжениях на сетках, т. е. $I_a = f(U_a)$ при $U_{c1} = \text{const}$ и $U_{c2} = \text{const}$.

Сеточно-анодная характеристика тетрода — это зависимость тока экранирующей сетки I_{c2} от анодного напряжения (рис. 14-28) при неизменных напряжениях на сетках, т. е. $I_{c2} = f(U_a)$ при $U_{c1} = \text{const}$ и $U_{c2} = \text{const}$.

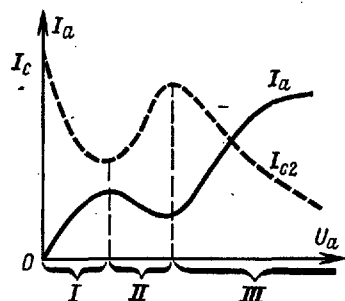


Рис. 14-28. Анодная характеристика тетрода и его сеточно-анодная характеристика $I_{c2} = f(U_a)$.

При увеличении анодного напряжения до некоторого значения (около 20 В) анодный ток увеличивается, а ток сетки I_{c2} уменьшается (рис. 14-28, участок I). При этом происходит перераспределение электронных потоков между анодом и экранирующей сеткой; первый поток увеличивается, второй — уменьшается.

Дальнейшее повышение анодного напряжения вызывает увеличение энергии электронов и появление *вторичной эмиссии анода*. Вторичные электроны направляются к экранирующей сетке, имеющей больший потенциал, чем анод. Поэтому анодный ток уменьшается, а сеточный I_{c2} увеличивается (рис. 14-28, участок II). Явление уменьшения анодного тока при увеличении анодного напряжения, вызванное вторичной эмиссией, носящее название **динатронного эффекта**, прекращается, когда анодное напряжение становится равным сеточному напряжению U_{c2} . При анодном напряжении, превышающем сеточное напряжение, вторичные электроны начинают возвращаться на анод и анодный ток снова начинает увеличиваться с увели-

чением анодного напряжения, а сеточный ток — соответственно уменьшаться (рис. 14-28, участок *III*).

Динатронный эффект делает почти невозможным применение тетродов в усилительных схемах вследствие неустойчивости режима работы и больших искажений.

в) Лучевой тетрод

В лучевом тетроде динатронный эффект устраняется созданием между анодом *A* и экранирующей сеткой *2* (рис. 14-29) отрицательного объемного заряда, поле которого тормозит вторичные электроны и возвращает их обратно на анод. С этой целью катод *K* имеет плоскую форму, управляющая (*1*) и экранирующая (*2*) сетки выполнены с одинаковым шагом намотки и витки их расположены точно друг за другом. Между экранирующей сеткой *2*

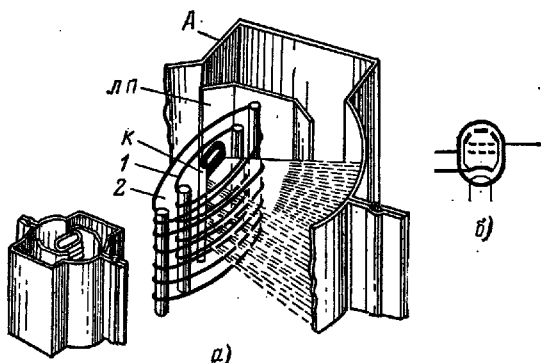


Рис. 14-29. Схема устройства лучевого тетрода (а) и его графическое обозначение (б).

и анодом *A* с боковых сторон укреплены две лучеобразующие металлические пластины *ЛП*, соединенные с катодом лампы.

При таком устройстве электродов электроны, летящие с катода на анод, формируются в плотные плоские электронные лучи, проходящие между витками сеток, причем лучеобразующие пластины преграждают путь электронным лучам с боковых сторон, концентрируя лучи в областях цилиндрических частей анода. В результате указанной концентрации электронных потоков в пространстве между экранирующей сеткой и анодом образуется отрицательный

объемный заряд, необходимый для устранения динаatronного эффекта.

На рис. 14-30 даны анодные характеристики лучевого тетрода, из которых видно, что динаatronный эффект полностью устраняется.

Лучевые тетроды имеют значительную проходную емкость $C_{ас1} = 0,2 \div 1$ пФ, так как шаг намотки экранирующей сетки нельзя сделать малым.

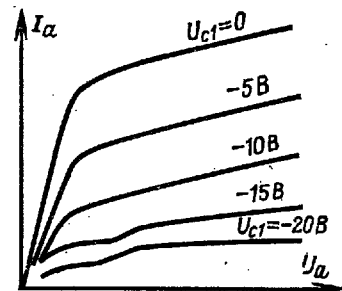


Рис. 14-30. Анодные характеристики лучевого тетрода.

Положительным свойством лучевого тетрода является малый ток экранирующей сетки, не превышающий 10% анодного тока. Лучевой тетрод имеет небольшой коэффициент усиления $\mu \leq 200$, малое внутреннее сопротивление $R_i = 20 \div 100$ кОм и большую крутизну характеристики $S = 4 \div 10$ мА/В.

14-8. Пятиэлектродные лампы — пентоды

Пентод — это пятиэлектродная электронная лампа, имеющая катод, анод и сетки: управляющую C_1 , экранирующую C_2 и защитную C_3 (рис. 14-31).

Защитная сетка C_3 , расположенная между экранирующей сеткой и анодом, соединяется с катодом, внутри лампы или снаружи, и следовательно, имеет нулевой потенциал $\varphi_{с3} = 0$. Потенциалы точек поля вблизи защитной сетки ниже потенциала анода, и поэтому вторичные электроны, покинувшие анод, попадают в тормозящее поле и возвращаются обратно на анод, так что динаatronный эффект устраняется.

В пентодах экранирующая сетка делается с меньшим шагом, а защитная с большим шагом, чем управляющая,

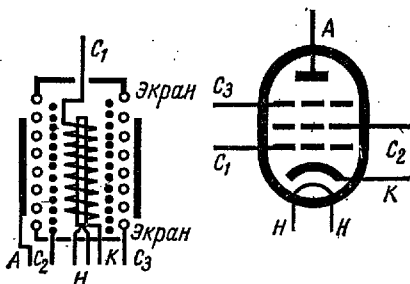


Рис. 14-31. Схема устройства высокочастотного пентода и его графическое обозначение.

что соответствует их назначению; экранирующая сетка предназначена для уменьшения проходной емкости, а защитная — для незначительного понижения потенциалов точек поля вблизи ее, обеспечивающего возврат вторичных электронов на эмиттирующую поверхность и в то же время не оказывающего значительного противодействия первичным электронам, излучаемым катодом.

Анодная характеристика пентода не имеет провалов, обусловленных динаatronным эффектом, и сходна с анодной характеристикой лучевого тетрода (рис. 14-30). В начале анодный ток с увеличением анодного напряжения резко возрастает, так как происходит перераспределение токов между анодом и экранирующей сеткой. При более высоком анодном напряжении ток растет медленно; так как в пентоде наличие третьей сетки приводит к еще большему ослаблению влияния анодного напряжения на поле лампы и на анодный ток. Поэтому коэффициент усиления и внутреннее сопротивление пентодов достигают больших значений $\mu = 1\,000$ и более, $R_i = 1 \div 2$ МОм. Крутизна характеристики, так же как и у триодов, составляет от нескольких единиц до десятков миллиампер на вольт.

Применением очень густой экранирующей сетки и дополнительным экранированием внутри лампы проходную емкость у высокочастотных пентодов получают не превышающей $0,003\text{--}0,004$ пФ, т. е. много меньше, чем у тетродов. Такие пентоды широко применяются при высоких частотах и являются основными приемно-усилительными и генераторными лампами.

Высокочастотные пентоды, у которых анодно-сеточные характеристики имеют два участка: длинный пологий 1 и круто идущий вверх 2 (рис. 14-32), называются лампами с удлинненными анодно-сеточными характеристиками или лампами с переменной крутизной. Управляющая сетка таких пентодов делается с переменным шагом намотки, большим в середине и меньшим по краям. Вследствие этого отдельные участки сетки обладают различными

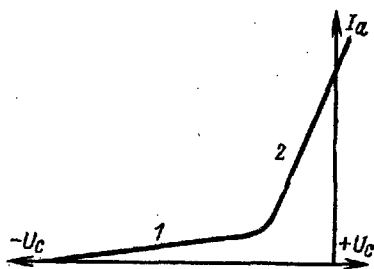


Рис. 14-32. Анодно-сеточная характеристика лампы с переменной крутизной.

проницаемостями. При больших отрицательных сеточных напряжениях часть сетки с малым шагом намотки заперта, работает только часть лампы с большим шагом намотки с малым коэффициентом усиления и небольшой крутизной характеристики (рис. 14-32, участок 1). При меньших сеточных напряжениях отпирается часть сетки с меньшим шагом намотки, с большим коэффициентом усиления и большой крутизной характеристик (участок 2).

Следовательно, у этих пентодов крутизна анодно-сеточной характеристики зависит от сеточного напряжения.

Пентоды с удлиненной характеристикой применяются, например, в радиоприемниках для автоматической регулировки усиления сильных и слабых сигналов.

14-9. Комбинированные и многосеточные лампы. Типы ламп

Для уменьшения габаритов электронных и радиотехнических устройств и для упрощения монтажа схем промышленностью выпускаются комбинированные и многосеточные электронные лампы.

Комбинированной лампой называется электронная лампа, у которой в одном баллоне находится

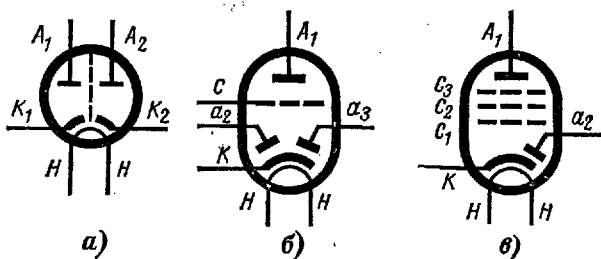


Рис. 14-33. Условные обозначения комбинированных ламп.

а — двойной диод; б — двойной диод — триод; в — диод—пентод.

несколько электродных систем, соответствующих тем или иным обычным лампам, например (рис. 14-33): двойной диод (а), двойной диод — триод (б); диод — пентод (в) и др.

Электронные лампы, состоящие из анода, катода и более чем трех сеток, называются многосеточными лампами. У таких ламп несколько электродов могут выполнять одинаковые функции, например, лампа, анодный ток которой

управляется двумя напряжениями, каждое из которых подается на свою сетку. Уменьшение влияния одной управляющей сетки на другую достигается применением дополнительной экранирующей сетки, расположенной между управляющими. Такие лампы типа тетрода с шестью электродами (рис. 14-34, а) называются гексодами, а типа пентода с семью электродами (рис. 14-34, б) называются гептодами, с восемью электродами — октодами.

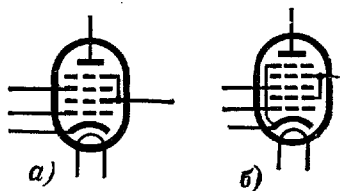


Рис. 14-34. Обозначения.

а — гексод; б — гептод.

В § 13-6 и 14-6 указывалось, что согласно ГОСТ 13393-67 второй элемент обозначает тип лампы. Для тетродов, пентодов и комбинированных ламп установлены следующие обозначения:

- П — выходной пентод или лучевой тетрод;
- К — высокочастотный пентод переменной крутизны;
- Ж — высокочастотный пентод;
- Г — диод — триод;
- Б — диод — пентод;
- И — триод — гексод, триод — гептод, триод — октод;
- Р — двойной тетрод или пентод.

14-10. Общие понятия, относящиеся к усилителям

Электронным усилителем называется устройство, предназначенное для усиления напряжения, тока или мощности слабых входных электрических колебаний (электрических сигналов) за счет источников энергии, питающих усилитель. Электронная лампа в этом процессе усиления играет роль управляющего элемента.

Электронные усилители весьма разнообразны. Их можно классифицировать по ряду признаков, например: 1) по диапазонам частот — усилители низкой частоты, усилители высокой частоты и усилители постоянного тока — точнее усилители весьма медленных колебаний в пределах от нуля до одного килогерца; 2) по числу ступеней или каскадов усиления — одно-, двух- и многокаскадные; 3) по роду усиливаемой величины — усилители напряжения, усилители мощности, усилители тока.

В усилителях напряжения мощность выходных колебаний усиливается главным образом за счет усиления напряжения этих колебаний. В усилителях мощности и тока мощность выходных колебаний усиливается главным образом за счет усиления тока. Усилитель мощности обычно является выходным или конечным звеном в многокаскадном усилителе.

По способу связи каскадов между собой различают три основных типа усилителей: с гальванической связью, с резистивно-емкостной и трансформаторной связью.

Наиболее распространенные в промышленной электронике усилители низкой частоты характеризуются следующими главными параметрами: коэффициентом усиления, диапазоном усиливаемых частот, выходной мощностью или выходным напряжением, чувствительностью и к. п. д.

Коэффициентом усиления усилителя напряжения называется отношение напряжения на выходе к напряжению на входе, т. е.

$$K_u = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}. \quad (14-15)$$

Коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления всех его каскадов, так как

$$K_1 K_2 \dots K_n = \frac{U_1}{U_{\text{вх}}} \frac{U_2}{U_1} \dots \frac{U_{n-1}}{U_{n-2}} \frac{U_{\text{вых}}}{U_{n-1}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = K_u. \quad (14-16)$$

Коэффициентом усиления усилителя мощности называется отношение мощности на выходе к мощности на входе усилителя, т. е.

$$K_p = P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}}. \quad (14-17)$$

В многокаскадных усилителях коэффициент усиления может достигать значения 10^6 и выше.

Для оценки усиления часто пользуются единицей, называемой *бел* [Б]. Усиление в 1 Б — это отношение мощностей 10/1, для которого десятичный логарифм равен единице. Следовательно, изменение мощности в белах определяется так:

$$S_p [\text{Б}] = \lg \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}. \quad (14-18)$$

Чаще пользуются децибелом-единицей, в 10 раз меньшей бела, так что

$$S_p [\text{дБ}] = 10 \lg \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}. \quad (14-18a)$$

При оценке усиления в децибелах многокаскадного усилителя оно определяется суммой усиления отдельных каскадов

$$S = S_1 + S_2 + \dots + S_n. \quad (14-19)$$

В случае определения усиления в децибелах мощности его находят исходя из того, что мощность пропорциональна квадрату величин напряжений или тока ($P = U^2/R = I^2R$):

$$S_u = 10 \lg \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}; \quad S_i = 10 \lg \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}}; \quad (14-20)$$

$$S_p = 20 \lg \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = 20 \lg \frac{I_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}}.$$

Пример 14-3. Входная мощность трехкаскадного усилителя $P_{\text{вх}} = 0,01$ Вт, а его выходная мощность $P_{\text{вых}} = 100$ Вт. Определить усиление усилителя как отношение мощностей и в децибелах.

Решение. Коэффициент усиления по мощности

$$K_p = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{100}{0,01} = 10\,000.$$

Усиление в децибелах

$$S_p = 10 \lg \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = 10 \lg \frac{100}{0,01} = 10 \lg 10\,000 = 40 \text{ дБ}.$$

Диапазоном частот усилителя называется область частот, в которой изменение коэффициента усиления не превосходит допустимых значений. В усилителях низкой частоты он ограничен пределами от нескольких десятков герц до десятков килогерц.

Выходной мощностью усилителя называется мощность, развиваемая усилителем в нагрузке

$$P_{\text{вых}} = \frac{1}{2} U_{\text{вых}}^2 \cdot \frac{1}{R_{\text{н}}}. \quad (14-21)$$

Номинальной выходной мощностью усилителя называется наибольшая мощность, развиваемая в нагрузке, при которой искажения не превосходят допустимых значений.

Электрический к. п. д. усилителя представляет собой отношение выходной мощности усилителя ($P_{\text{вых}}$) к мощности источника анодного питания лампового усилителя (P_0), т. е.

$$\eta_{\text{эл}} = P_{\text{вых}} / P_0. \quad (14-22)$$

Промышленный к. п. д. усилителя представляет собой отношение выходной мощности усили-

теля к суммарной мощности питания всех цепей усилителя, т. е.

$$\eta_{\text{пр}} = P_{\text{вых}} / P_{\text{общ}} \quad (14-23)$$

Электрический к. п. д. усилителя мощности низкой частоты имеет значение 40—70%. Промышленный к. п. д. значительно ниже электрического к. п. д.

В реальных усилителях электрический сигнал, проходя через усилитель, искажается. Различают искажения сигналов частотные, амплитудные и фазовые.

Ч а с т о т н ы м и и с к а ж е н и я м и называются искажения формы электрического сигнала, обусловленные различной степенью усиления,

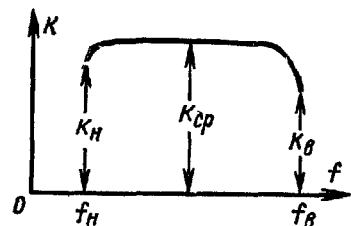


Рис. 14-35. Частотная характеристика усилителя низкой частоты.

слагающих напряжения различной частоты. Из частотной характеристики усилителя низкой частоты (рис. 14-35) видно, что на средних частотах коэффициент усиления усилителя постоянен (K_{cp}), а с повышением и понижением частоты (f_B и f_H) коэффициент усиления уменьшается (K_B и K_H). Частотные искажения оценивают коэффициентом частотных искажений и определяют как отношение коэффициента усиления K_{cp} к коэффициенту усиления данной частоты, т. е.

$$M = K_{\text{cp}} / K_1 \quad (14-24)$$

Этот коэффициент показывает, насколько велико отклонение усиления на данной частоте от усиления на средней частоте. Допустимое значение коэффициента частотных искажений составляет 1,25.

А м п л и т у д н ы м и и л и н е л и н е й н ы м и и с к а ж е н и я м и называются искажения формы кривых усиливаемых колебаний, сопровождающиеся изменением частотного спектра на выходе усилителя. Эти искажения являются следствием нелинейности характеристик электронных ламп или нагрузки усилителя.

Характеристикой нелинейных искажений служит коэффициент нелинейных искажений, который представляет собой отношение корня квадратного из суммы квадратов напряжений (или токов) высших гармоник на нагрузке

усилителя к напряжению (или току) первой гармоники колебаний на нагрузке, т. е.

$$\gamma = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}. \quad (14-25)$$

В усилителях различного назначения для коэффициента нелинейных искажений допускаются значения 0,05—15%.

Ф а з о в ы м и и с к а ж е н и я м и называется изменение фазы электрического колебания на выходе усилителя относительно фазы колебания на его входе. Фазовые искажения вызываются реактивными элементами выпрямителя L и C . Фазовые искажения имеют существенное значение для усилителей телевизионных и радиолокационных устройств и не играют роли в обычных усилителях низкой частоты.

14-11. Режимы работы усилителей

В зависимости от положения рабочей точки A на анодно-сеточной характеристике, а также в зависимости от величины амплитуды переменного входного напряжения (сигнала) относительно напряжения сеточного смещения $U_{с0}$ различают три основных режима работы усилителя: A , B и C .

У с и л и т е л ь в р е ж и м е A (рис. 14-36, а). Рабочая точка A усилителя в этом режиме находится на середине прямолинейной части анодно-сеточной характеристики. Амплитуда входного сигнала не выходит за пределы линейной части характеристики и не заходит в область положительного сеточного напряжения. При работе усилителя в режиме A имеет место значительная постоянная составляющая анодного тока I_{a0} и непрерывное протекание анодного тока. В этом режиме нелинейные искажения малы, к. п. д. усилителя низкий (до 30%).

У с и л и т е л ь в р е ж и м е B (рис. 14-36, б), в этом режиме рабочая точка A находится в начале анодно-сеточной характеристики, анодный ток проходит только в течение одного полупериода, в течение второго полупериода триод заперт. Произведение угловой частоты ω и времени t' , в течение которого анодный ток изменяется от амплитудного значения до нуля, называется *углом отсечки* θ . В этом режиме *угол отсечки* $\theta = 90^\circ$. При работе усилителя в режиме B анодный ток I_{a0} при отсутствии внешнего сигнала равен нулю или весьма незначителен. При работе усилителя

в этом режиме получаются большие искажения, а к. п. д. его режим высокий, чем в режиме А, и достигает 60—70%.

Если усилитель работает в режиме В без сеточных токов, то режим называют B_1 , а при сеточных токах — B_2 .

Усилитель в режиме С (рис. 14-36, в). В этом режиме рабочая точка А находится за пределами анодно-

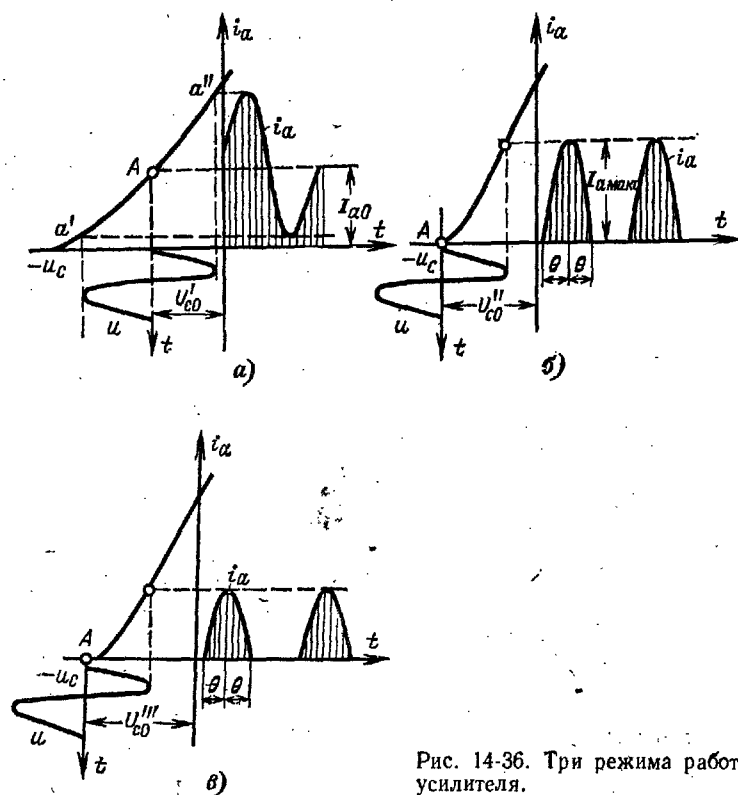


Рис. 14-36. Три режима работы усилителя.

сеточной характеристики, т. е. левее ее, следовательно, напряжение смещения превышает напряжение запираения. Поэтому анодный ток проходит в течение менее полупериода, т. е. угол отсечки $\theta < 90^\circ$. Режим С вносит очень большие искажения. Коэффициент полезного действия его достигает 80% и выше.

Кроме рассмотренных трех основных режимов, применяются промежуточные режимы усиления. В режиме АВ

рабочая точка A расположена правее начала анодно-сеточной характеристики. Аналогично ранее сказанному, если усилитель работает без сеточных токов, то он имеет режим AB_1 , а при наличии этих токов AB_2 . Коэффициент полезного действия при работе в этом режиме составляет до 50—60%.

14-12. Многокаскадные ламповые усилители

а) Усилители напряжения на сопротивлениях

Двухкаскадный реостатный усилитель с триодами (рис. 14-37) применяется для усиления переменного напряжения в широком диапазоне частот от нескольких герц до 100 кГц и выше.

Режим работы триода определяется напряжением источника питания E_a анодной цепи и напряжением сеточного смещения U_{c0} , которое создается автоматически постоянной

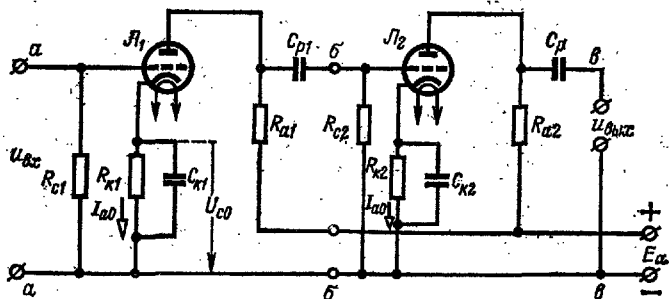


Рис. 14-37. Схема двухкаскадного реостатного усилителя напряжения с триодами.

составляющей анодного тока I_{a0} , как это было показано в § 14-5.

При работе триода в схеме усилителя напряжения необходимо, чтобы при любом значении входного напряжения потенциал сетки по отношению к катоду был отрицателен, так как при положительном потенциале сетки возникает сеточный ток, а созданное им падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника сигнала R_{c1} вызовет искажение сигнала, что недопустимо.

Обычно к сетке подводится отрицательное напряжение смещения порядка нескольких вольт.

Резисторы R_{c1} и R_{c2} обеспечивают передачу на сетки постоянного отрицательного потенциала напряжения $U_{c0} =$

$= -I_{a0}R_K$ относительно катода; кроме того, они обеспечивают стекание с сетки зарядов, попавших на них случайно. Сопротивления R_{c1} и R_{c2} имеют значение от 100 кОм до 1 МОм.

Сопротивления резисторов R_{a1} и R_{a2} анодной нагрузки для триодов имеют значение порядка десятков килоом.

Конденсатор C_{p1} является *разделительным*. Он устраняет возможность прохождения постоянной составляющей тока нагрузки первого каскада через резистор R_{c2} , включенный на входе второго каскада. Следовательно, напряжение на сетке второго триода U_{c2} не зависит от постоянной составляющей тока в анодной цепи первой лампы. Однако

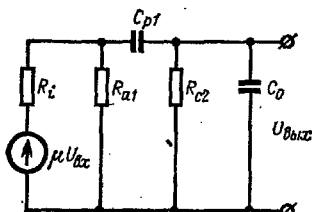


Рис. 14-38. Полная схема замещения усилителя.

разделительный конденсатор должен обладать для переменных составляющих тока сопротивлением, во много раз (в 10—20) меньшим, чем R_{c2} . Емкость разделительного конденсатора обычно составляет тысячи или десятки тысяч пикофард. Ее можно определить из соотношения

$$\frac{1}{\omega_n C_{p1}} \leq 0,05 R_{c2}'' \quad (14-26)$$

Входное переменное напряжение $u_{вх}$ вызывает в анодной цепи первой лампы пульсирующий ток. Постоянная составляющая этого анодного тока проходит через выходной резистор R_{a1} , но не может пройти через разделительный конденсатор C_{p1} в сеточный резистор R_{c2} . Часть переменной составляющей анодного тока первой лампы проходит через конденсатор C_{p1} и сеточный резистор R_{c2} второй лампы, создает на нем напряжение, представляющее собой выходное напряжение первого каскада $U_{вых1} = U_{вх} K_1$. Это напряжение в то же время является входным для второго каскада $U_{вх1} = U_{вх2}$, которое после усиления второй лампой поступает на выходные зажимы второго каскада $U_{вых2} = U_{вых1} K_2 = U_{вх1} K_1 K_2$.

При изучении процесса усиления переменного напряжения полезно рассмотреть эквивалентную схему (рис. 14-38). При этом усилительную лампу можно заменить генератором с э. д. с. $\mu U_{вх}$ и внутренним сопротивлением R_i (см. § 14-5). При рассмотрении эквивалентной схемы цепи для переменного тока источника питания постоянного тока можно считать замкнутыми накоротко. Учитывая сказанное, анодное

сопротивление R_a следует подключить непосредственно к этому генератору. Напряжение на резисторе R_a является выходным для первого каскада. Оно через конденсатор C_{p1} подается на входной резистор второго каскада R_{c2} . Параллельно сопротивлению резистора R_{c2} включена емкость C_0 , представляющая собой сумму выходной емкости каскада $C_{ак1}$, входной емкости лампы $L_2 C_{ск2}$ и емкости проводов сеточной цепи первой лампы C_m , т. е.

$$C_0 = C_{ак1} + C_{ск2} + C_m.$$

Таким образом, на рис. 14-38 дана полная схема замещения двух-каскадного усилителя. В диапазоне средних частот (200—2 000 Гц) влиянием емкости разделительного конденсатора C_{p1} и емкости C_0 можно пренебречь и эквивалентная схема может быть упрощена (рис. 14-39).

Заменив сопротивление двух параллельных ветвей одним эквивалентным, получим:

$$R_э = \frac{R_{a1} R_{c2}}{R_{a1} + R_{c2}}.$$

Коэффициент усиления каскада на средних частотах можно определить, учитывая (14-13):

$$K_{cp} = \mu \frac{R_э}{R_i + R_э}. \quad (14-27)$$

Усилители на резисторах получили широкое применение вследствие ряда положительных свойств: незначительные искажения сигнала, хорошая частотная характеристика, простота схемы, малые габариты, масса и низкая стоимость.

Из недостатков усилителя необходимо отметить большое падение напряжения на резисторе R_a от постоянной составляющей анодного тока $U_{a0} = I_{a0} R_a$ и большое напряжение источника питания.

б) Усилители напряжения на трансформаторах

В усилителях с трансформаторной связью (рис. 14-40) в анодную цепь первой лампы включена первичная обмотка повышающего трансформатора $Tr1$. Под действием переменной составляющей анодного тока первой лампы L_1 во вторичной обмотке трансформатора

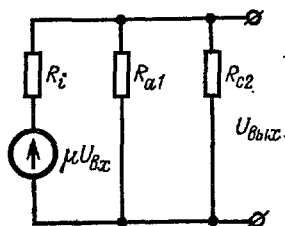


Рис. 14-39. Схема замещения усилителя для средних частот.

$Tr1$ индуцируется э. д. с., которая воздействует на потенциал сетки второй лампы Λ_2 . В анодную цепь второй лампы также включена первичная обмотка повышающего трансформатора $Tr2$, вторичная обмотка которого присоединена к нагрузке или к сетке лампы следующего каскада.

Естественно, при трансформаторной связи разделительный конденсатор не нужен, так как анодная цепь первой лампы электрически не связана с сеточной цепью второй лампы и поэтому постоянная составляющая анодного тока не может проникнуть из первой цепи во вторую.

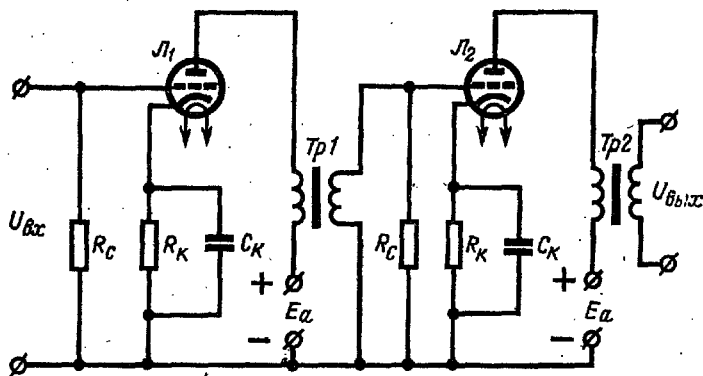


Рис. 14-40. Схема двухкаскадного усилителя на трансформаторах.

Применение повышающего трансформатора позволяет коэффициент усиления напряжения K каждого каскада сделать больше статического коэффициента усиления μ лампы данного каскада.

Допустим ради упрощения, что ток холостого хода и потери в трансформаторе равны нулю. Следовательно, при входном напряжении трансформатора $U_{вх.т} = \mu U_c$ его выходное напряжение, подведенное к сетке второй лампы, $U_{вых.т} = U_{вх.т} \omega_2 / \omega_1 = U_{вх.т} k_t = \mu U_c k_t$, а коэффициент усиления напряжения каскада

$$K = U_{вых.т} / U_c = \mu U_c k_t / U_c = \mu k_t. \quad (14-28)$$

Таким образом, применение повышающего трансформатора позволяет получить увеличение коэффициента усиления напряжения каскада. Коэффициент трансформации k_t междукаскадного трансформатора не превышает 3—5, так как увеличение его может вызвать увеличение магнитных

потоков рассеяния и паразитных емкостей трансформатора, что в свою очередь может привести к снижению коэффициента усиления напряжения.

Эквивалентная схема одного каскада усилителя на трансформаторах дана на рис. 14-41, а.

Как и в схеме рис. 14-38, лампа заменена генератором с э. д. с. $\mu U_{\text{вх}}$ и с внутренним сопротивлением R_i . Первичная обмотка трансформатора представлена на схеме активным сопротивлением r_1 и реактивным сопротивлением рас-

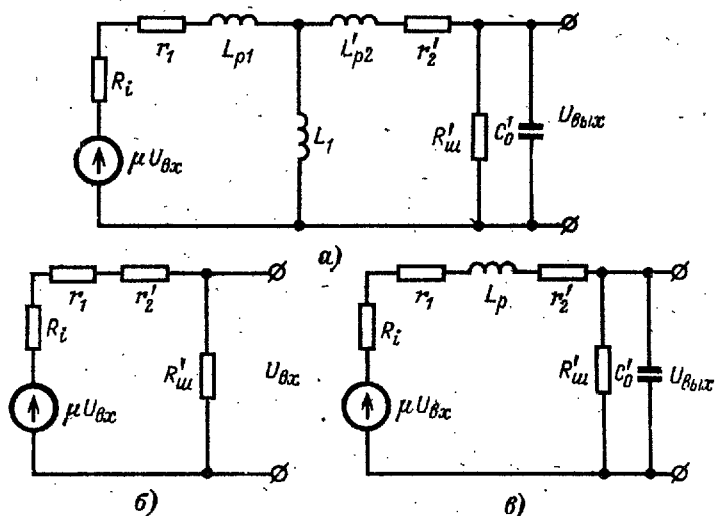


Рис. 14-41. Схемы замещения трансформаторного усилителя.
а — полная; б — для средних частот; в — для высоких частот.

сеяния ωL_{p1} . Рабочий магнитный поток трансформатора обуславливает основную индуктивность L_1 и соответственно реактивное сопротивление ωL_1 . Все элементы схемы вторичной цепи трансформатора пересчитаны согласно (9-10) на первичную обмотку и обозначены соответствующими буквами со штрихами. Вторичная обмотка на эквивалентной схеме определена активным сопротивлением r_2' и индуктивностью рассеяния L_{p2}' . Емкость $C_0' = C_0 k_T^2$ аналогична таковой на схеме рис. 14-38 и учитывается только на высших частотах.

При средних частотах можно пренебречь влиянием индуктивностей L_{p1} , L_{p2}' и L_1 , вследствие чего схема упрощается (рис. 14-41, б).

При высших частотах (рис. 14-41, в) влиянием шунтирующей индуктивности L_1 можно пренебречь, а индуктивности рассеяния L_{p1} и L_{p2} можно заменить одной эквивалентной L_p .

При повышении частоты в контуре с L_p и C_0 возможен резонанс напряжений, что приводит к увеличению коэффициента усиления (рис. 14-42).

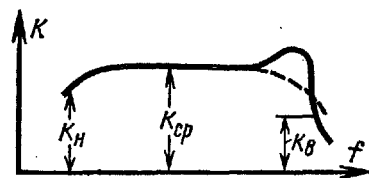


Рис. 14-42. Частотная характеристика усилителя на трансформаторах.

Включение шунта $R_{ш}$ (рис. 14-41, а) параллельно конденсатору C_0 выводит схему из резонанса и устраняет пик в частотной характеристике усилителя.

Уменьшение частоты в области низких частот сопровождается уменьшением индуктивного сопротивления ωL_1 , что вызывает увеличение тока и падение напряжения на резисторе R_i и соответственно уменьшение выходного напряжения и коэффициента усиления, так что частотная характеристика с уменьшением частоты падает (рис. 14-42).

Наряду с достоинствами усилителя на трансформаторах (большой коэффициент усиления напряжения и меньшее анодное напряжение по сравнению с усилителем на сопротивлениях) он обладает рядом следующих недостатков; сложность устройства, большие искажения сигнала, большие габариты, масса и стоимость. Поэтому усилители напряжения на трансформаторах применяются сравнительно редко.

в) Понятие об усилителях мощности

Усилитель мощности низкой частоты обычно является конечным каскадом усилительного устройства (например, радиоприемника).

Нагрузкой его может служить электромагнитное реле, репродуктор или телефон.

Схемы усилителя мощности и усилителя напряжения аналогичны друг другу, но требования, предъявляемые к ним, различны, так же как различны элементы схем и их параметры.

Усилитель мощности должен развивать в заданной нагрузке наибольшую мощность (ток), причем коэффициент нелинейного искажения не должен выходить за допустимые границы.

Простейшая схема каскада усилителя мощности низкой частоты дана на рис. 14-43, а, а на рис. 14-43, б — его эквивалентная схема.

Мощность, развиваемая переменным током в нагрузке (14-13),

$$P_a = \frac{1}{2} I_a^2 R_n = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu U_{вх}}{R_i + R_n} \right)^2 R_n.$$

Умножив числитель и знаменатель дроби на величину $1/R_i^2$, получим:

$$P_a = \frac{1}{2} \frac{\mu}{R_i} \frac{R_n}{R_i} \frac{\mu U_{вх}^2}{\left(\frac{R_i}{R_i} + \frac{R_n}{R_i} \right)^2};$$

заменяв согласно (14-7) и (14-8) $\mu/R_i = S$; $\mu S = G$ и обозна-

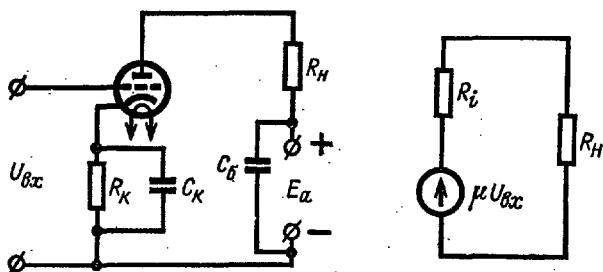


Рис. 14-43. Простейшая схема каскада усилителя мощности низкой частоты и его эквивалентная схема.

чив отношение $R_n/R_i = \alpha$ — коэффициентом нагрузки, получим окончательно:

$$P_a = \frac{1}{2} S \mu U_{вх}^2 \alpha / (1 + \alpha)^2 = \frac{1}{2} G U_{вх}^2 \alpha / (1 + \alpha)^2. \quad (14-29)$$

Из (14-29) следует, что выходная мощность каскада зависит от добротности лампы G , входного напряжения $U_{вх}$, коэффициента нагрузки α , точнее от функции $f(\alpha) = \alpha / (1 + \alpha)^2$.

Таким образом, для получения наибольшей мощности от каскада усилителя необходимо 1) применение по возможности большего входного напряжения, по исключающего нелинейные искажения; 2) применение лампы с высокой добротностью $G = \mu S$, или что то же с большими коэффициентом усиления и крутизной характеристики; 3) выбор наиболее выгоднейшей величины $\alpha = R_n/R_i$.

При коротком замыкании нагрузки, т. е. при $R_n = 0$ и $\alpha = 0$, а также при отключении нагрузки, т. е. при $R_n =$

$= \infty$ и $\alpha = \infty$, мощность, развиваемая в нагрузке, равна нулю, так как в первом случае $U_n = 0$, а во втором $I_n = 0$.

Для нахождения сопротивления нагрузки R_n , при котором мощность нагрузки P_a имеет наибольшее значение, возьмем первую производную $f'(\alpha)$ и приравняем ее нулю:

$$f'(\alpha) = f'[\alpha/(1+\alpha)^2] = \frac{(1+\alpha)^2 - 2\alpha(1+\alpha)}{(1+\alpha)^4} = 0;$$

отсюда получим:

$$1 + 2\alpha + \alpha^2 - 2\alpha - 2\alpha^2 = 0$$

и
$$1 - \alpha^2 = 0; \quad \alpha^2 = 1, \quad \text{а} \quad \alpha = R_n/R_i = 1.$$

Следовательно, наибольшая мощность выделяется при $R_n = R_i$.

При более подробном анализе этого вопроса оказывается, что сопротивление нагрузки R_n целесообразно повышать до двукратного значения внутреннего сопротивления триода, т. е. $R_n = 2R_i$, что соответствует значению $\alpha = 2$.

Если сопротивление нагрузки удовлетворяет равенству $R_n = 2R_i$, то его непосредственно включают в анодную цепь (рис. 14-43).

На практике чаще встречается случай, когда $R_n \ll \ll 2R_i$, например, сопротивление громкоговорителя

имеет значение 3—20 Ом, а внутреннее сопротивление триода около 1 кОм. В этом случае необходимо применить выходной понижающий трансформатор (рис. 14-44), для согласования нагрузки. Согласование состоит в том, что для каждой нагрузки подбирают такой коэффициент трансформации трансформатора, при котором мощность в заданном сопротивлении R_n будет наибольшей, т. е. такой же, как и в сопротивлении R_n , при котором $\alpha = 2$, если его непосредственно включить в анодную цепь.

Если коэффициент трансформации трансформатора (9-5) $k_r = \omega_1/\omega_2$, то сопротивление нагрузки, приведенное к первичной цепи (9-10), $R'_a = R'_n = R_n k_r^2$. Величина R'_a должна

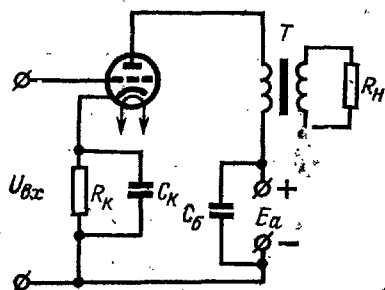


Рис. 14-44. Схема усилителя мощности с выходным трансформатором.

быть равна αR_i и при заданном R_n необходимый коэффициент трансформации определяется из выражения

$$k_T = \sqrt{\alpha R_i / R_n} = \sqrt{2 R_i / R_n}. \quad (14-30)$$

Пример 14-4. Определить коэффициент трансформации выходного трансформатора, если внутреннее сопротивление лампы $R_i = 840$ Ом, а сопротивление нагрузки $R_n = 4$ Ом.

Решение. Коэффициент трансформации выходного трансформатора

$$k_T = \sqrt{\alpha R_i / R_n} = \sqrt{2 \cdot 840 / 4} \approx 20.$$

г) Применение пентода для усилителя

Каскад усилителя на пентоде может дать большее усиление, чем на триоде (§ 14-8).

Схема реостатного усилительного каскада с пентодом дана на рис. 14-15.

Все сказанное в § 14-12, а в отношении каскада реостатного усилителя с триодом (рис. 14-37) в основном остается справедливым и в отношении каскада усилителя с пентодом.

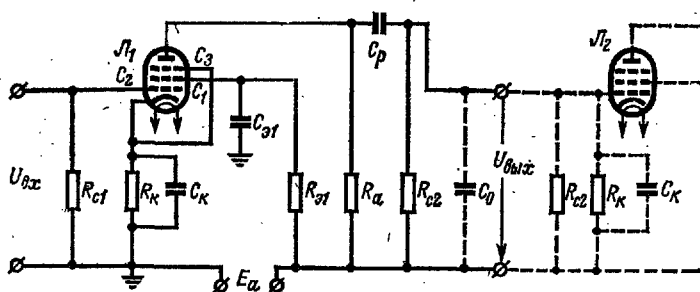


Рис. 14-45. Схема реостатного усилительного каскада с пентодом.

В усилителях на триодах сопротивление анодной нагрузки R_a составляет 2—5 внутреннего сопротивления триода R_i , а в усилителях на пентодах $R_a / R_i \approx 0,1 \div 0,2$.

При применении пентода защитная сетка C_3 соединяется с катодом лампы, а в цепь питания его экранирующей сетки включаются резистор $R_{с1}$ и конденсатор $C_{с1}$. В цепи экранирующей сетки проходит ток $I_{с2}$. Величина сопротивления резистора $R_{с1}$ выбирается из условия создания необходимого, нормального для данного типа пентода, постоянного напряжения на экранирующей сетке $U_{с2} = E_a - I_{с2} R_{с1}$ и обычно составляет сотни килоом.

При воздействии на вход усилителя переменного напряжения, подлежащего усилению, ток экранирующей сетки и анодный ток будут изменяться, что не должно вызвать изменения U_{c2} . Это постоянство достигается применением конденсатора C_{31} , емкость которого должна быть достаточно большой ($1/\omega C_{31} \leq 0,5 R_{c2}$).

14.13. Обратная связь в усилителях

Обратной связью в усилителях называется воздействие выходной цепи усилителя на ее входную цепь. Электрическая цепь, соединяющая выход усилителя с ее входом, называется цепью обратной связи (ЦОС). Обратная связь называется положительной, если она вызывает увеличение общего коэффициента усиления, в противном случае она называется отрицательной.

В усилителях с обратной связью (рис. 14-46) на вход подается напряжение обратной связи $U_{o.c.}$, составляющее часть выходного напряжения $U_{вых.}$.

Отношение

$$\beta = U_{o.c.}/U_{вых.}$$

Рис. 14-46. Схема усилителя с обратной связью.

называется коэффициентом обратной связи.

В усилителе с обратной связью входное напряжение состоит из суммы напряжения сигнала и напряжения обратной связи, т. е.

$$U_{вх} = U_{сиг} + U_{o.c.}$$

Приняв во внимание, что коэффициент усиления усилителя без обратной связи

$$K = U_{вых}/U_{вх},$$

а коэффициент усилителя при наличии обратной связи

$$K_{o.c.} = U_{вых}/U_{сиг},$$

выражение входного напряжения примет вид:

$$U_{вх} = U_{сиг} + U_{o.c.} = U_{вых}/K_{o.c.} + U_{вых}\beta = U_{вых} \left(\frac{1}{K_{o.c.}} + \beta \right).$$

Из последнего выражения нетрудно получить выражение коэффициента усиления усилителя с обратной связью

$$K_{o.c} = \frac{1}{1 - \beta K}. \quad (14-31)$$

При $\beta K = 1$ положительная обратная связь называется *критической*, так как коэффициент усиления усилителя становится равным бесконечности ($K_{o.c} = \infty$) и усилитель переходит на *генераторный режим работы*, при котором напряжение на выходе может иметь место даже при отсутствии входного напряжения.

Коэффициент усиления усилителя с отрицательной обратной связью (т. е. при $U_{o.c} < 0$ и $\beta < 0$) меньше коэффициента усиления усилителя без отрицательной обратной связи.

Отрицательная обратная связь улучшает характеристики усилителя и, в частности, уменьшает частотные и фазовые искажения усилителя. Это объясняется тем, что всякая гармоника, возникающая в усилителе и искажающая сигнал, после усиления подается частично на вход усилителя через линию обратной связи, имея противоположную фазу, вследствие чего происходит частичная компенсация гармоники, искажающей сигнал.

14-14. Лабораторная работа. Снятие анодных и анодно-сеточных характеристик триода и определение по ним статических параметров

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с содержанием § 14-1—14-3.

П л а н р а б о т ы

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их основные технические данные, в том числе номинальные токи и номинальные напряжения для испытуемого триода по указанию руководителя.

2. Собрать схему (рис. 14-5) и показать ее руководителю. Для испытания можно взять, например, триод 6С2С: $U_H = 6,3$ В; $U_a = 250$ В; $I_a = 20$ мА; $S = 2,5$ мА/В; $\mu = 20,5$.

3. Установить движки реостатов P_c и P_a в исходные положения, при которых $U_c = 0$ и $U_a = 0$.

Установить номинальное напряжение накала.

Установив сеточное напряжение $U_c = -12$ В и изменяя анодное напряжение через равные интервалы, например 50 В (50—100—150—200—250 В), наблюдать значения анодного тока I_a , записывая показания в табл. 14-1.

Затем наблюдения повторять при сеточных напряжениях, указанных в табл. 14-1.

Таблица 14-1

№ наблюдений	$U_c = 0$		$U_c = -2В$		$U_c = -4В$		$U_c = -8В$		$U_c = -12В$	
	U_a	I_a	U_a	I_a	U_a	I_a	U_a	I_a	U_a	I_a
	В	мА	В	мА	В	мА	В	мА	В	мА

4. По полученным данным построить семейство анодных характеристик.

5. Установив анодное напряжение, например 50 В, определить отрицательное напряжение, при котором анодный ток равен нулю (т. е. запирающее сеточное напряжение), и уменьшая отрицательное сеточное напряжение, например при значениях его —12; —8; —4; —2 В и 0, наблюдать значения анодного тока, записывая показания приборов в табл. 14-2.

Затем наблюдения повторить, повышая напряжение на одинаковые значения (50—100—150—200—250 В).

Таблица 14-2

№ наблюдений	$U_a = 50В$		$U_a = 100В$		$U_a = 150В$		$U_a = 200В$		$U_a = 250В$	
	U_c	I_a	U_c	I_a	U_c	I_a	U_c	I_a	U_c	I_a
	В	А	В	мА	В	А	В	А	В	А

6. Определить запирающее сеточное напряжение при анодном напряжении $U_a = 100 В$ и $U_a = 150 В$.

7. По полученным данным построить семейство анодно-сеточных характеристик.

8. По семействам анодных и анодно-сеточных характеристик определить основные параметры триода: $R_t = \Delta U_a / \Delta I_a$, $S = \Delta I_a / \Delta U_c$ и $\mu = \Delta U_a / \Delta U_c$.

9. Проверить правильность найденных параметров, подставив их в основное уравнение триода:

$$\mu = SR_t$$

14-15. Лабораторная работа. Снятие частотных характеристик усилителя напряжения низкой частоты

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с содержанием § 14-5, 14-6, 14-11 и 14-12.

Из § 14-6 известно, что коэффициент усиления усилителя

$$K = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} \quad (14-15)$$

Коэффициент усиления зависит от реактивных сопротивлений схемы усилителя, которые в свою очередь зависят от частоты, так что коэффициент усиления с изменением частоты сигнала изменяется, т. е. происходят *частотные искажения*.

В реостатных усилителях напряжения (рис. 14-45) частотные искажения в нижнем диапазоне частот (рис. 14-35) обуславливаются преимущественно влиянием сопротивления емкости разделительного конденсатора C_p . Емкостное сопротивление этого конденсатора при уменьшении частоты увеличивается, а сопротивление резистора $R_{с2}$, соединенного последовательно, остается неизменным. Это приводит к уменьшению напряжения на резисторе $R_{с2}$, т. е. на сетке лампы следующего каскада и, следовательно, к уменьшению коэффициента усиления усилителя (рис. 14-35).

Частотные искажения в верхнем диапазоне частот, т. е. при увеличении частоты, обуславливаются уменьшением емкостного сопротивления емкости C_0 (рис. 14-45). Резистор $R_{с2}$ шунтируется сопротивлением емкости C_0 (рис. 14-45) и при уменьшении его емкостного сопротивления сопротивление этого разветвления уменьшается, что приводит к уменьшению выходного напряжения первого каскада и, следовательно, к уменьшению коэффициента усиления.

П л а н р а б о т ы

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их основные технические данные.

2. Собрать схему (рис. 14-47), состоящую из трех основных элементов: а) генератора звуковой частоты, например типа ГЗ-2; б) усилителя и в) лампового вольтметра, например типа ВЛУ-2.

3. Показать схему для проверки руководителю.

4. а) Поддерживая входное напряжение усилителя постоянным $U_{вх} = 0,1$ В и изменяя частоту от 20 Гц до 20 кГц при различных значениях ее, указанных в табл. 14-3, измерить выходное напряжение усилителя $U_{вых}$ при значениях параметров усилителя, заданных руководителем, например: $R'_a = 100$ кОм, $C'_p = 0,05$ мкФ, $C'_0 = 20$ пФ.

б) Для всех случаев измерения определить коэффициент усиления усилителя.

в) Наблюдения и расчеты записать в табл. 14-3.

5. Повторить наблюдения и расчеты, указанные в п. 4, при других значениях параметров усилителя по указанию руководителя, например: $R''_a = 5$ кОм, $C''_p = 0,05$ мкФ, $C''_0 = 20$ пФ.

6. Повторить наблюдения и расчеты, указанные в п. 4 при измененных по указанию руководителя значениях параметров усилителя, например: $R'''_a = 100$ кОм, $C'''_p = 200$ пФ, $C'''_0 = 200$ пФ.

7. По полученным данным построить в общих осях координат три частотные характеристики усилителя $K = F(f)$.

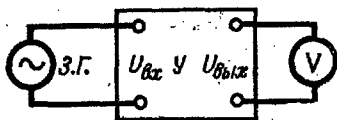


Рис. 14-47. Схема соединения к лабораторной работе «Снятие частотных характеристик усилителя напряжения низкой частоты».

№ п/п.	Частота f	п. 4 задания		п. 5 задания		п. 6 задания	
		$U_{\text{вых.}}$ В	K	$U_{\text{вых.}}$ В	K	$U_{\text{вых.}}$ В	K
1	20 Гц						
2	50 Гц						
3	100 Гц						
4	200 Гц						
5	500 Гц						
6	1 кГц						
7	1,5 кГц						
8	5 кГц						
9	10 кГц						
10	15 кГц						
11	20 кГц						

Глава пятнадцатая

Газоразрядные приборы
и их применение

15-1. Виды газового разряда и его вольт-амперная характеристика

В электронных приборах движение электронов происходит без столкновений, или без соударений их с атомами газа. В ионных приборах, наоборот, при движении электронов происходит соударение их с атомами или молекулами газа или ртутного пара, которым заполняются баллоны приборов.

Кинетическая энергия электрона $mv^2/2$ зависит от его скорости. При соударении электроны передают часть своей кинетической энергии атомам или молекулам газа.

При малой скорости движения электрона соударение с атомами будет упругим, при котором происходит только изменение скорости движения соударяющихся частиц. При больших скоростях движения электронов соударения становятся неупругими, при которых энергия, получаемая атомом газа, достаточна для ионизации или для возбуждения атома.

Ионизация газа состоит в расщеплении его атомов на электроны и положительные ионы. Атомы и молекулы газа

представляют собой устойчивые системы электрически заряженных частиц. Поэтому для отделения электрона надо совершить работу по преодолению сил взаимного притяжения. Эта работа называется работой ионизации ($A_{и}$). Она характеризуется потенциалом ионизации $\varphi_{и}$ или разностью потенциалов $U_{и}$ между двумя точками пути движения электрона в электрическом поле, на котором энергия его увеличивается до значения работы ионизации

$$A_{и} = U_{и}e. \quad (15-1)$$

Значения потенциалов ионизации для некоторых газов даны в табл. 15-1.

Таблица 15-1

Потенциалы возбуждения и ионизации для некоторых газов

Газы	Гелий	Неон	Аргон	Криптон	Ксенон	Пары ртути
Потенциал возбуждения $U_{в}$, В	20,8	16,6	11,6	9,9	8,4	4,9
Потенциал ионизации $U_{и}$, В	24,5	21,5	15,7	14,0	12,1	10,4

Таким образом, для ионизации газа необходимо, чтобы кинетическая энергия электрона была равна или больше работы ионизации, т. е.

$$mv_{\text{макс}}^2/2 \geq A_{и} = U_{и}e.$$

Если кинетическая энергия электрона недостаточна для ионизации газа, то он может вызвать возбуждение атома газа. При возбуждении атома газа один из его электронов, получив некоторую порцию энергии, переходит на более высокий неустойчивый энергетически уровень, но через короткое время (примерно 10^{-8} с) возвращается на свой прежний энергетический уровень, выделяя при этом избыточную энергию в виде светового излучения (квант света). Таким образом, возникает свечение газа. Атомы газа, которые могут находиться в возбужденном состоянии более продолжительное время, называются метастабильными.

Для возбуждения атома газа необходима энергия, определяемая потенциалом возбуждения $U_{в}$, т. е.

$$mv_{\text{макс}}^2/2 \geq A_{в} = U_{в}e. \quad (15-2)$$

Значения потенциалов возбуждения для некоторых газов дапы в табл. 15-1.

Соударение свободного электрона с возбужденным атомом может привести к его ионизации, которая в этом случае называется *ступенчатой* и для которой нужна меньшая кинетическая энергия свободного электрона.

Газ в обычных условиях является хорошим диэлектриком, так как содержит ничтожное количество свободных электронов и ионов. Наблюдающаяся ничтожная проводимость газа вызывается постоянной ионизацией его лучами радиоактивных веществ, содержащихся в земной коре и в атмосфере, и космическими лучами. Ультрафиолетовые и рентгеновские лучи, сильное электрическое поле и высокие температуры также вызывают ионизацию газа.

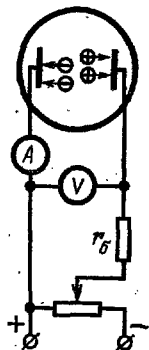


Рис. 15-1. Схема соединения для получения вольт-амперной характеристики газового промежутка.

При непрерывной ионизации газа с постоянной интенсивностью происходит не только расщепление молекул на электроны и положительные ионы, но и образование отрицательных ионов в результате соединения свободных электронов с нейтральными атомами. В то же время происходит процесс воссоединения (рекомбинация) некоторой части ионов с электронами с образованием нейтральных молекул, так что число ионов и свободных электронов в единице объема газа остается постоянным.

Если между электродами газоразрядного прибора (рис. 15-1), к которым приложено напряжение, находится газ, ионизируемый с постоянной интенсивностью, то под действием сил электрического поля положительные ионы перемещаются в направлении поля, а электроны и отрицательные ионы в обратном направлении, таким образом в цепи проходит электрический ток.

Совокупность явлений, происходящих в газе при прохождении через него электрического тока, называется **электрическим разрядом в газе**.

При увеличении напряжения между электродами (рис. 15-1) вначале ток растет пропорционально напряжению. Начальная часть *ОА* вольт-амперной характеристики (рис. 15-2) прямолинейна. При дальнейшем увеличении напряжения рост тока замедляется (участок *АБ*), а затем

совсем прекращается (участок $БВ$). В этом случае все ионы, образовавшиеся под действием ионизатора, переносятся от одного электрода к другому без рекомбинаций. Максимальный ток, возможный при данной интенсивности ионизации, называется **током насыщения**.

Электрический разряд в газе, для возникновения и поддержания которого необходимо воздействие на газ внешнего (постороннего) ионизатора, называется **несамостоятельным разрядом**.

Сильное электрическое поле может вызвать в газовой среде самостоятельный разряд, т. е. такой, который возникает и поддерживается без действия других внешних факторов. Очевидно, для его существования необходимо непрерывное образование свободных заряженных частиц. Источником их является **ударная ионизация газа**.

При увеличении напряжения между электродами (рис. 15-1) при некотором его значении, называемом **напряжением зажигания U_z** , ток в газе резко возрастает (участок $ВГ$ на рис. 15-2) в результате ударной ионизации и возбуждения атомов газа. Газ начинает слабо светиться. Вновь полученные вторичные заряды в свою очередь также ионизируют нейтральные атомы газа. Процесс образования ионов развивается **лавинообразно**. Разрядный промежуток оказывается заполненным ионизированным газом, содержащим примерно одинаковое количество положительных и отрицательных заряженных частиц — **газовой плазмой**. Газовая плазма обладает большой проводимостью, которая увеличивается с повышением температуры. Сила тока в этом случае ограничивается балластным сопротивлением r_6 (рис. 15-1), соединенным последовательно с разрядным промежутком.

При нормальном и пониженном давлении в газах наблюдаются три различных стадии самостоятельного разряда: **темный, тлеющий и дуговой**. Характер разряда зависит от напряжения, формы и расположения электродов, расстояния между ними, от состава газа, температуры, давления и т. д.

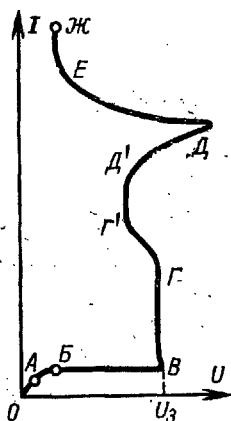


Рис. 15-2. Вольт-амперная характеристика газового промежутка.

Темный (тихий) разряд. Как показывает само название, этот разряд сопровождается весьма слабым испусканием света и звука. Он представляет собой начальную стадию самостоятельного разряда и характеризуется незначительными плотностями тока (примерно 10^{-6} А/см²). Темному разряду соответствует участок *ВГ* вольт-амперной характеристики газового разряда (рис. 15-2). Ионизация газа за счет космических лучей и естественной радиоактивности Земли происходит вдоль всего междуэлектродного промежутка. Электроны перемещаются к аноду, а положительные ионы — к катоду. Когда число ионов, падающих на катод, становится достаточным для того, чтобы выбитые ими электроны могли поддерживать разряд без внешнего ионизатора, разряд из несамостоятельного *переходит в самостоятельный*.

Тлеющий разряд. Темный разряд переходит в тлеющий, который сопровождается свечением газа и для которого характерны значительно большие плотности тока (более 10^{-3} А/см²) и большая интенсивность ионизации, в связи с чем уменьшается напряжение на электродах (участок *ГД* характеристики рис. 15-2). Нормальный тлеющий разряд характеризуется постоянной плотностью тока на катоде (участок кривой *Г'Д'*, расположенный параллельно оси тока). Это означает, что площадь поверхности катода, через которую проходит ток (светящийся участок поверхности), изменяется пропорционально току. После того как ток начнет проходить через всю поверхность катода, что соответствует точке *Д'* характеристики, нормальный тлеющий разряд переходит в *аномальный тлеющий разряд*, при котором плотность тока, проходящего через поверхность катода, начнет нарастать. Это требует повышения напряжения между электродами, при этом увеличивается и напряжение на прикатодном участке разрядного промежутка, где положительные ионы образуют объемный заряд. Увеличение этого катодного падения напряжения означает возрастание на этом участке напряженности поля, ускоряющего электроны, и увеличение интенсивности ионизации.

Тлеющий разряд используется в газосветных (неоновых) лампах, в газотронах, тиратронах, стабилитронах и других приборах.

Дуговой разряд (электрическая дуга). Для него характерны очень большие плотности тока на катоде (до 10^2 А/см² и выше) при относительно низком напряжении (примерно 15—30 В). Дуговой разряд может развиваться

и поддерживаться как при разреженном газе, так и при нормальном атмосферном давлении.

Дуговой разряд можно получить различными путями:

1. При повышении напряжения на разрядном промежутке до некоторого значения, называемого напряжением зажигания дуги $U_{з.д}$ (точка D на рис. 15-2), тлеющий разряд переходит в дуговой (участок $EЖ$ на рис. 15-2). При этом поддержание дуги происходит за счет термоэлектронной эмиссии катода, раскаленного ударами ионов. Такой дуговой разряд называется *самостоятельным*. Термоэлектронная эмиссия вызывает увеличение числа электронов, т. е. силы тока в дуге, а следовательно, увеличение падения напряжения на балластном сопротивлении и уменьшение напряжения на электродах.

Если термоэлектронная эмиссия катода вызывается нагреванием катода током от внешнего источника питания, то дуговой разряд будет *несамостоятельным*.

2. При электросварке дуговой разряд получают сближением электродов до их соприкосновения. Сильное нагревание током места соприкосновения электродов обеспечивает ионизацию междуэлектродного промежутка и образование электрической дуги при их раздвигании. Газоразрядная плазма между электродами имеет очень высокую температуру (выше $4000^{\circ}C$) и обладает большой проводимостью. При увеличении тока температура и проводимость плазмы увеличиваются, а напряжение между электродами падает, так что характеристика дуги имеет падающий характер (рис. 15-3).

Наряду с дуговым разрядом, обусловленным термоэлектронной эмиссией с твердого металлического катода, возможен дуговой разряд с электростатической эмиссией, получаемой с поверхности ртутного (жидкого) катода, например в ртутных вентилях. Дуговой разряд в них происходит в парах ртути. Основанием дуги является светящееся пятно на поверхности ртутного катода, эмиттирующее электроны, ионизирующие пары ртути, получаемые с поверхности того же катодного пятна. Электрическая дуга открыта в 1802 г. русским академиком В. В. Петровым.

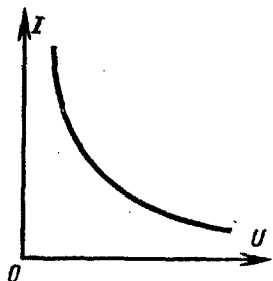


Рис. 15-3. Вольт-амперная характеристика электрической дуги.

Наряду с тремя основными видами газового разряда, рассмотренными выше, различают еще две разновидности разряда:

1. **Коронный разряд** (корона). На поверхности круглых проводов малого диаметра или на заостренных частях проводов (на остриях) имеют место значительные напряженности электрического поля. Если они достигают некоторого критического значения, то в этих местах появляется разряд, который сопровождается слабым свечением, заметным в темноте, называемым короной, вызванной ионизацией и возбуждением газа.

2. **Искровой разряд** или просто искра. Если напряжение между двумя электродами достигнет значения *пробивного напряжения*, а напряженность поля между электродами *пробивной напряженности* (§ 1-7), то произойдет искровой разряд. Он имеет вид ярко светящегося извилистого канала, соединяющего электроды. Лавина электронов и ионов, перемещающаяся в канале по пути наименьшего сопротивления, вызывает резкое повышение температуры и давления, отчего он сопровождается характерным треском.

15-2. Ионные приборы с несамостоятельным дуговым разрядом

а) Газотрон

Газотрон представляет собой газоразрядный ионный прибор, предназначенный для выпрямления переменного тока. Стекланный или металлический баллон после создания в нем вакуума заполняется парами ртути или инертным газом при давлении 15—70 Па (0,1—0,5 мм рт. ст.). Газотрон имеет два электрода (рис. 15-4). Анод его выполняется из никеля или графита, катод — из вольфрамовой проволоки, покрытой слоем оксида. В мощных газотронах катод помещается внутри цилиндрического экрана, уменьшающего тепловые потери.

Катод питается от трансформатора накала. Напряжение накала должно быть не более 5 В, так как при большем напряжении при малом потенциале ионизации (для ртути около 10 В) может возникнуть дуга между концами катода. Таким образом, ток накала должен быть большим — от нескольких ампер до нескольких десятков ампер; большим будет и время разогрева катода — от нескольких минут до нескольких десятков минут.

При увеличении анодного напряжения от нуля в газотроне сначала возникает только небольшой электронный ток, так как электроны в слабом электрическом поле между катодом и анодом имеют скорости, недостаточные для ионизации газа. Этому режиму работы соответствует участок OA вольт-амперной характеристики газотрона (рис. 15-5). При повышении анодного напряжения до величины, несколько превышающей потенциал ионизации газа, электроны, покинувшие катод, под действием электрического поля получают скорости, достаточные для возбуждения и ионизации газа или паров ртути. Таким образом, в приборе начнется процесс ионизации

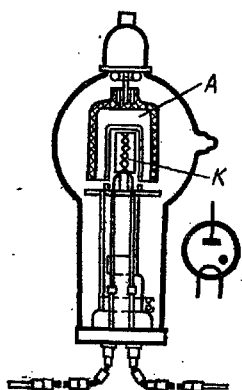


Рис. 15-4. Газотрон и его условное обозначение.

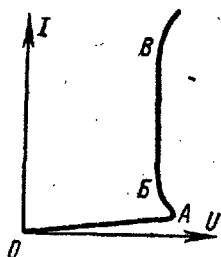


Рис. 15-5. Вольт-амперная характеристика газотрона.

газа, образования плазмы и возникнет дуговой разряд, чему соответствует точка A характеристики газотрона.

Положительные ионы, полученные при ионизации газа, компенсируют объемный отрицательный заряд вблизи катода, вследствие чего несколько увеличивается электронная эмиссия.

Увеличение тока при уменьшении сопротивления анодной цепи вследствие изменения нагрузки или при увеличении напряжения источника питания почти не влияет на величину падения напряжения между анодом и катодом.

Рабочему режиму газотрона соответствует участок BB' его вольт-амперной характеристики. Дальнейшее повышение напряжения и тока (за точкой B) недопустимо, так как может вызвать опасный нагрев и разрушение газотрона. Преимущество газотрона перед вакуумным диодом заключается в меньшем падении напряжения в нем, вследст-

ние чего выпрямители с газотронами имеют более высокий к. п. д.

Как уже отмечалось, газотрон требует большего времени для нагрева катода до рабочей температуры, которая должна быть получена до включения анодного напряжения (во избежание потери эмиссии катодом).

На рис. 15-6 даны графики напряжений и токов для однополупериодного выпрямления с помощью газотрона. Положительное анодное напряжение сначала растет до момента зажигания, затем несколько спадает и далее остается постоянным. В конце положительного полупериода оно

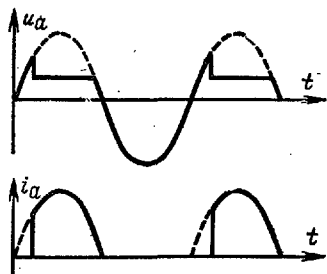


Рис. 15-6. Графики напряжений и токов газотрона в схеме однополупериодного выпрямления.

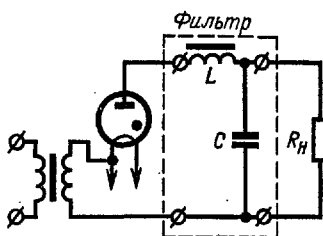


Рис. 15-7. Газотронный выпрямитель с фильтром.

уменьшается до нуля. Отрицательная полуволна анодного напряжения имеет обычную форму синусоиды. Анодный ток на графике имеет форму импульсов синусоидальной формы со срезанной начальной частью.

Выпрямители с газотронами работают по тем же схемам, что и с вакуумными диодами, только на входных зажимах фильтра не должно быть конденсатора (рис. 15-7), так как в противном случае зарядный ток конденсатора может превысить допустимый $I_{a.макс}$ и вызвать потерю эмиссии катода, т. е. выход газотрона из строя.

Основными параметрами, знание которых необходимо для нормальной эксплуатации газотрона, являются: 1) напряжение и ток накала; 2) максимальное и среднее значения выпрямленного тока; 3) падение напряжения на газотроне; 4) допустимое обратное напряжение; 5) время разогрева катода.

Наибольший или максимальный анодный ток не должен превышать тока эмиссии катода.

Допустимое обратное напряжение — это отрицательное напряжение на аноде, которое газотрон может выдержать без нарушения его вентиляющего действия, т. е. без зажигания обратной дуги.

Газотроны применяются в выпрямителях небольшой мощности (например, для зарядки аккумуляторов, питания цепей управления и др.).

б) Тиратрон

Т и р а т р о н отличается от газотрона наличием третьего электрода сетки (рис. 15-8), предназначенной для управления анодным током. Катод тиратрона окружен металлическим экраном, верхнее отверстие которого закрыто сеткой, имеющей форму диска с отверстиями. Экран исключает возможность возникновения электрического поля между анодом и катодом помимо сетки.

Сообщим сетке отрицательный потенциал по отношению к катоду. В этом случае электрическое поле сетки в пространстве между сеткой и катодом будет направлено противоположно основному полю тиратрона и движение электронов между катодом и анодом замедлится. Таким образом, для каждого анодного напряжения существуют такие значения отрицательного потенциала сетки, при которых электроны движутся со скоростью, недостаточной для ионизации газа или паров ртути. Уменьшив отрицательный потенциал сетки до некоторого критического значения, вызываем изменение анодного тока, так же как и в вакуумном триоде (рис. 15-9). При критическом сеточном напряжении U_{c1} скорость движения электрона становится достаточной для ионизации газа и происходит *зажигание дуги и образование плазмы*. При этом анодный ток скачком возрастает до величины I_{a1} , которая определяется нагрузочным сопротивлением $R_a = R_n$ и напряжением U_a .

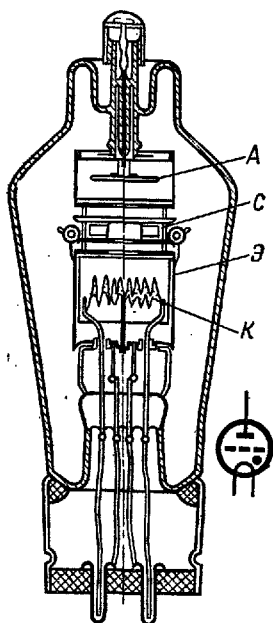


Рис. 15-8. Тиратрон и его условное обозначение.

С момента зажигания дуги анодный ток не зависит от сеточного напряжения. Это объясняется тем, что при горячей дуге сетка покрыта слоем положительных ионов, которые нейтрализуют отрицательные заряды сетки, поэтому она перестает влиять на анодный ток. Для гашения дуги необходимо уменьшить анодное напряжение до значения, близкого к нулю.

При неизменном напряжении между сеткой и катодом U_c зажигание дуги происходит при некотором анодном напряжении U_a , следовательно, изменением напряжения на сетке

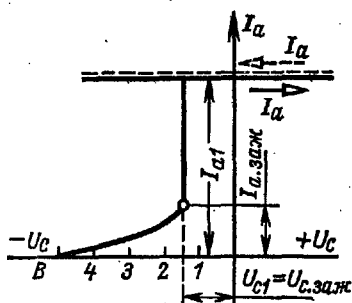


Рис. 15-9. Анодно-сеточная характеристика тиратрона с подогревным катодом.

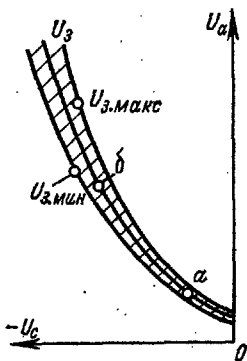


Рис. 15-10. Пусковая характеристика и пусковая область тиратрона.

можно регулировать величину анодного напряжения (U_a), при котором зажигается тиратрон.

Кривая зависимости U_a от напряжения на сетке U_c называется *пусковой характеристикой тиратрона* (рис. 15-10). При определенном напряжении на сетке и повышении анодного напряжения зажигание может произойти при напряжении, лежащем в границах от $U_{з.мин}$ до $U_{з.макс}$, так как напряжение зажигания зависит от *давления в колбе, температуры окружающей среды, сопротивления цепи сетки, тока накала и т. д.* Поэтому вместо пусковой характеристики обычно дают пусковую область, ограниченную кривыми $U_{з.мин}$ и $U_{з.макс}$ (рис. 15-10).

Для ограничения сеточного тока в цепь сетки включается сопротивление величиной от одного до ста килоом.

При работе тиратрона в цепи выпрямителя он в течение каждого периода один раз зажигается при положительном анодном напряжении и один раз гаснет при анодном напря-

жении, близком к нулю. Подведем к сетке переменное напряжение U_c той же частоты, что и анодное напряжение U_a , но сдвинутое относительно последнего по фазе на угол ψ_1 (рис. 15-11, а). Зажигание произойдет, когда отрицательное сеточное напряжение уменьшится, а анодное увеличится, так что оба напряжения будут соответствовать точке а (рис. 15-10), лежащей на пусковой характеристике.

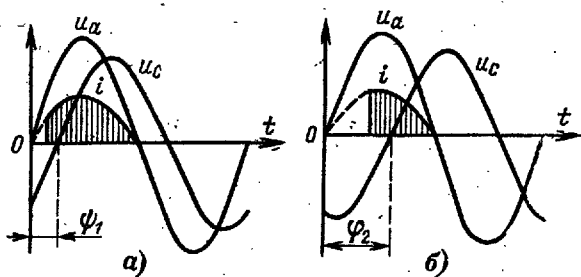


Рис. 15-11. Кривые напряжения и тока в тиратроне при различных углах сдвига между анодным и сеточным напряжением.

Изменив фазу сеточного напряжения, можно изменить момент зажигания тиратрона (точка б на рис. 15-10). Таким образом, можно регулировать продолжительность прохождения анодного тока в течение периода, т. е. регулировать среднее значение тока и напряжения (рис. 15-11, б).

Тиратроны применяются в цепях переменного тока с частотой не более 1—10 кГц, так как при большей частоте заряд у сетки не успевает рассасываться и управление тиратроном становится невозможным.

Тиратроны применяются в выпрямителях, преобразователях постоянного тока в переменный, автоматике и телемеханике и т. д.

15-3. Приборы с тлеющим разрядом

а) Неоновая лампа

В большинстве индикаторов используется катодное свечение газа, возникающее в результате преобразования электрической энергии.

Для получения достаточно хорошего свечения баллоны индикаторов заполняются *неоном* или *неоном с примесью*

аргона при давлении 2 500—4 000 Па (20—30 мм рт. ст.). Поэтому световые индикаторы часто называются *неоновыми сигнальными лампами*. Световые индикаторы изготавливаются двухэлектродными или многоэлектродными, последние называются также цифровыми лампами, так как их катодам придается форма цифр.

У двухэлектродных индикаторов, предназначенных для цепей переменного тока, электроды делаются одинаковыми, например в виде дисков; у индикаторов для цепей постоянного тока катодам придают разную форму.

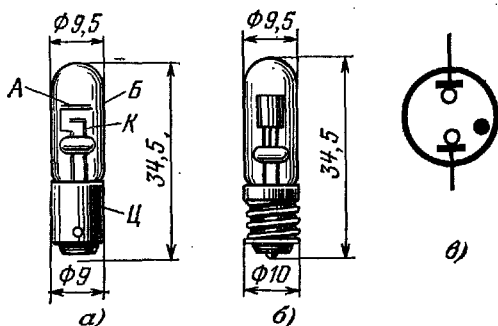


Рис. 15-12. Световые индикаторы — неоновые лампы.

Малогабаритные индикаторы типа ТН-0,2 и ТН-0,3 (рис. 15-12) предназначены для питания от источника постоянного напряжения. Мощность их составляет доли ватта.

Анод индикатора типа ТН-0,2 (рис. 15-12, а) имеет форму кольца, катод — форму диска с оксидным покрытием.

Анод индикатора типа ТН-0,3 (рис. 15-12, б) выполнен в виде проволоки диаметром 3 мм. Катод — цилиндрический с оксидным покрытием. Рассмотренные индикаторы применяются в качестве сигнальных ламп.

Напряжение зажигания тлеющего разряда всегда несколько выше напряжения горения разряда, поэтому во избежание перегрузок индикаторов последовательно с ними включаются балластные резисторы. У индикаторов нормальных габаритов, например типа ТН-30, они помещаются в цоколе индикатора, у малогабаритных индикаторов они внешние.

Цифровые индикаторы или цифровые лампы позволяют непосредственно производить визуальный отсчет численных значений контролируемой величины.

В цифровой лампе (рис. 15-13, а) размещается десять проволочных (вольфрамовых) катодов, соответствующих цифрам десятичного ряда 0—9. Анод в виде тонкой сетки (рис. 15-13, б) расположен перед катодами. Он связан электрически с боковым экраном, окружающим катоды, что

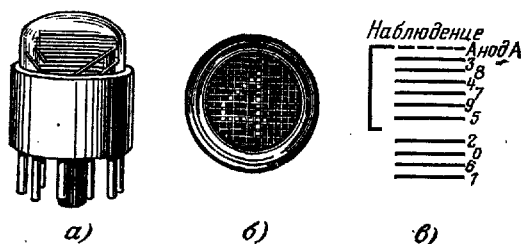


Рис. 15-13. Цифровой индикатор.

а — внешний вид сбоку; б — вид с торца; в — расположение электродов.

обеспечивает примерно одинаковое расстояние между анодом и каждым из катодов.

Порядок расположения катодов (рис. 15-13, в), цифровые значения которых указаны на рисунке справа, обеспечивает минимальное затемнение светящегося в данный момент катода.

Включение катодов производится с помощью коммутатора.

б) Стабилитрон

Приборы тлеющего разряда, предназначенные для стабилизации напряжения, т. е. для поддержания неизменным напряжения на нагрузке или на определенном участке цепи постоянного тока, называются стабилитронами тлеющего разряда или газоразрядными стабилитронами.

Стабилитрон имеет стеклянный баллон (рис. 15-14), в котором расположен цилиндрический катод К, а на оси его проволочный анод А. Баллон заполняется смесью инертных газов аргон — неон, аргон — гелий или другими при давлении 2 500—4 000 Па (20—30 мм рт. ст.).

Катод выполняется из стали никеля или молибдена, с внутренней стороны активизируется барием или цезием для уменьшения работы выхода.

Рабочий участок ABB вольт-амперной характеристики (рис. 15-15) стабилитрона расположен почти параллельно оси ординат.

Стабилитрон включается параллельно нагрузке с сопротивлением R_H (рис. 15-16). Последовательно с разветвлен-

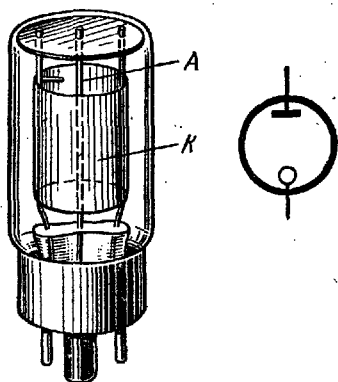


Рис. 15-14. Стабилитрон и его условное обозначение.

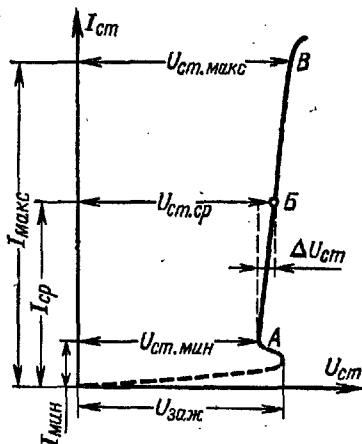


Рис. 15-15. Вольт-амперная характеристика газоразрядного стабилитрона.

ным участком включается балластный резистор с сопротивлением R_6 .

Ток в резисторе, равный току источника питания,

$$I = I_{ст} + I_H.$$

Входное напряжение равно сумме падений напряжений на балластном резисторе $U_6 = IR_6$ и на сопротивлении нагрузки (на стабилитроне), т. е.

$$U_{вх} = U_6 + U_{ст} = IR_6 + U_{ст}.$$

Любое, даже довольно значительное изменение входного напряжения вызывает почти такое же изменение на балластном резисторе ($\Delta U_{вх} \approx \Delta U_6$) и незначительное изменение

напряжения на стабилитроне, так как последнее вызывает значительное изменение тока в стабилитроне и резисторе ($\Delta IR_6 = \Delta U_6$).

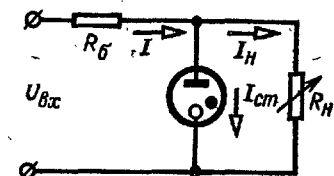


Рис. 15-16. Схема стабилизатора с газоразрядным стабилитроном.

При неизменном входном напряжении увеличение тока нагрузки вызывает уменьшение тока в стабилитроне и незначительное изменение напряжения на нагрузке.

Работа стабилизатора оценивается коэффициентом стабилизации, который показывает, во сколько раз относительное изменение входного напряжения меньше относительного изменения напряжения на нагрузке

$$k_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{нх}}/U_{\text{вх}}}{\Delta U_{\text{н}}/U_{\text{н}}} = \frac{\Delta U_{\text{нх}} U_{\text{н}}}{\Delta U_{\text{н}} U_{\text{вх}}} \quad (15-3)$$

Для получения больших стабилизированных напряжений применяется последовательное соединение стабилитронов.

Стабилитроны изготавливаются на напряжения от 70 В и выше на токи от 5 до 40 мА.

в) Бареттер

Бареттером называется негазоразрядный прибор, предназначенный для поддержания постоянства тока в цепи при изменении напряжения питания.

Бареттер состоит из стеклянного баллона, внутри которого укреплена железная или вольфрамовая проволока. Баллон бареттера заполняется водородом при давлении 6 000—25 000 Па (50—200 мм рт. ст.).

Условия охлаждения и нагревания нити бареттера подобраны так, что изменение напряжения на ее зажимах вызывает почти пропорциональное ему изменение сопротивления нити. Таким образом, в известных границах изменение напряжения вызывает очень незначительное изменение тока.

Включая бареттер последовательно с нагрузкой (рис. 15-17), получаем незначительное изменение тока в цепи при значительном изменении напряжения источника питания. Если сопротивление нагрузки постоянно, то при изменении напряжения сети будут почти постоянными не только ток, но и напряжение на нагрузке.

Бареттер можно применять в цепях постоянного и переменного тока, так как он не реагирует на быстрые изменения тока в течение периода.

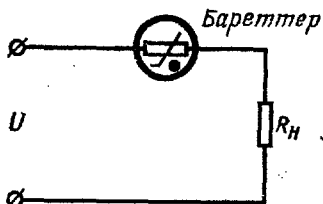


Рис. 15-17. Схема включения бареттера.

Бареттер обладает значительной инерцией, которая достигает 1—3 мин.

В некоторых областях бареттеры нашли довольно широкое применение, так, например, в технике связи они применяются для стабилизации тока в цепях накала электронных ламп.

г) Тиратрон с тлеющим разрядом (с холодным катодом)

Тиратрон с холодным катодом — это ионный прибор с тлеющим разрядом. Простейший прибор состоит из баллона с тремя электродами (рис. 15-18), анодом A , катодом K и сеткой C , расположенной вблизи

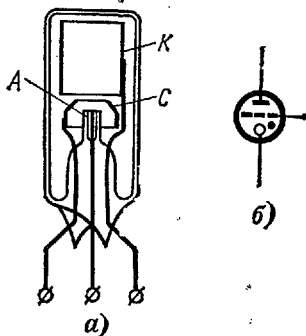


Рис. 15-18. Тиратрон тлеющего разряда.

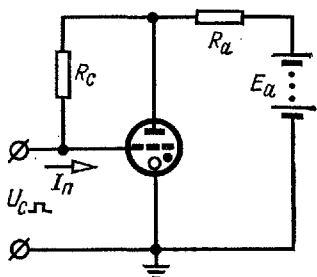


Рис. 15-19. Схема включения тиратрона тлеющего разряда.

катода. Последняя предназначена для управления моментом начала разряда. Состав газа и его давление такие же, как и в стабилитроне.

Катод тиратрона — цилиндрической формы, активированный. Анод стержневой формы из молибдена, конец его выступает из стеклянной оболочки. Сетка представляет собой полый цилиндр из никеля с отверстием (рис. 15-18).

Источник питания E_a (рис. 15-19) создает между катодом и анодом напряжение (рабочее напряжение), достаточное для поддержания разряда, но недостаточное для его зажигания. При подаче на сетку положительного импульса в цепи сетка — катод возникает ток в несколько микроампер, называемый током поджига $I_{п}$, и в зазоре сетка — катод появляется разряд. При этом некоторое количество заряженных частиц проникает в пространство между анодом и катодом, вследствие чего между ними возникает *тлеющий*

разряд и в анодной цепи начинает проходить ток порядка десятка миллиампер.

Характеристикой зажигания тиратрона (рис. 15-20) называется зависимость анодного напряжения зажигания от тока поджига $U_{a.з} = f(I_n)$. Чем больше электронов вводится в пространство между анодом и катодом, т. е. чем больше ток поджига, тем меньше напряжение зажигания, но оно не меньше рабочего.

Резистор R_c (несколько мегом) между сеткой и анодом (рис. 15-19) обеспечивает стабильность зажигания, так как при наличии его в схеме имеет место темный разряд между сеткой и катодом и определенное число заряженных частиц в междуэлектродном пространстве.

Гашение тиратрона производится или размыканием анодной цепи, или уменьшением анодного напряжения ниже рабочего.

Достоинством рассмотренных тиратронов являются малые размеры и масса, высокая механическая прочность, широкий диапазон рабочих температур ($-60 \div +100^\circ \text{C}$), высокая долговечность, большая экономичность (отсутствие цепи накала).

Тиратроны с холодным катодом применяются в схемах автоматики и других областях как *бесконтактные реле*.

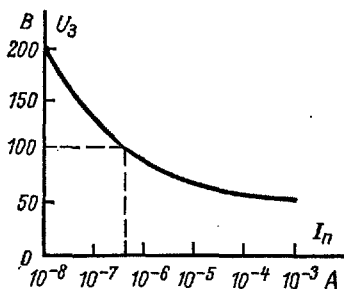


Рис. 15-20. Характеристика зажигания тиратрона тлеющего разряда.

15-4. Ионные приборы с самостоятельным дуговым разрядом

а) Общие замечания

Основными приборами с самостоятельным дуговым разрядом, обладающими односторонней проводимостью, являются *ртутные вентили*.

Ртутные вентили являются наиболее распространенными газоразрядными приборами для выпрямителей большой мощности.

В ртутных вентилях в качестве катода применяется ртуть. Применение ее обеспечивает практически неограни-

ченный срок службы катода и возможность иметь большую эмиссию.

Современные ртутные вентили изготавливаются с металлическими корпусами.

Ртутные вентили в зависимости от способа получения и поддержания вспомогательной дуги на катоде делятся на две группы: **э к с и т р о н ы** и **и г н и т р о н ы**. Первые из них наряду с главными анодами имеют вспомогательные аноды возбуждения, которые при пуске зажигают дугу и поддерживают ее, в частности, при отключении нагрузки. Вторые, т. е. **игнитроны**, не имеют вспомогательных анодов возбуждения; они имеют **э л е к т р о д - з а ж и г а т е л ь**, который перед началом каждого положительного полупериода переменного напряжения искрой зажигает дугу.

6) Экситрон

В настоящее время изготавливаются или многоанодные металлические вентили, или комплекты из нескольких однофазных металлических вентилях на токи до нескольких тысяч ампер при средних значениях напряжений или до нескольких сот ампер при высоких напряжениях.

Схема устройства и соединения треханодного трехфазного экситрона показана на рис. 15-21. В металлическом сосуде, в котором создан вакуум, расположены: ртутный катод K , три главных рабочих анода A_1, A_2, A_3 и два вспомогательных анода возбуждения A_v . Три главных анода A_1, A_2 и A_3 присоединены к трем вторичным обмоткам трехфазного трансформатора. Эти обмотки соединены звездой, нулевая точка которой служит минусом цепи нагрузки. Аноды возбуждения A_v питаются от вспомогательного трансформатора $Tr. в.$ Они предназначены для поддержания вспомогательной дуги независимо от величины нагрузки R_n .

Для пуска выпрямителя замыкают кнопку K_n , подавая напряжение на вспомогательный трансформатор $Tr. в.$ Под действием э. д. с. верхней половины вторичной обмотки этого трансформатора пройдет ток в цепи — резистор r_0 — полупроводниковый зажигатель Z — ртутный катод K — резистор r_v — дроссель Dr . Полупроводниковый зажигатель — стержень из карбида бора не смачивается ртутью, и поэтому при прохождении тока между стержнем и ртутью возникают небольшие искры, вызывающие ионизацию. Под действием электрического поля электроны от катода направляются к тому вспомогательному аноду A_v .

потенциал которого в данный момент времени положителен по отношению к катоду. При своем движении электроны ионизируют пары ртути, пространство между катодом и вспомогательным анодом заполняется плазмой и между электродами возникает дуговой разряд. С уменьшением потенциала первого вспомогательного анода и одновременным увеличением потенциала второго анода до величины,

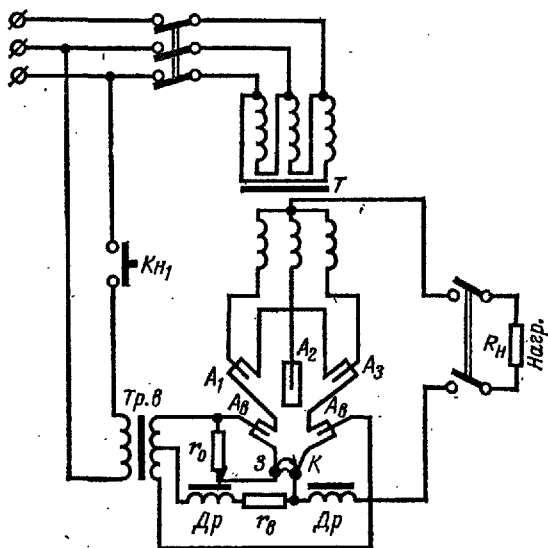


Рис. 15-21. Устройство и схема соединения трех-анодного экситрона.

превышающей потенциал первого, дуга с первого вспомогательного анода перейдет на второй.

Падение напряжения на плазме мало, и большая часть падения напряжения на вентиле приходится на слой, прилегающий к ртутному катоду — на слой между катодом и ионным облаком, образующимся на некотором расстоянии над катодом. Напряженность поля в этом прикатодном слое достигает больших значений (около 10^6 В/см) и под действием этого поля происходит электростатическая эмиссия с поверхности катода. Источником эмиссии является светящееся ртутное пятно, непрерывно перемещающееся по поверхности катода.

Для поддержания пятна, а следовательно, и дуги анодный ток не должен падать ниже 4—5 А.

При уменьшении анодного напряжения ниже некоторого критического значения на одном из анодов дроссель *Др* (рис. 15-21) поддерживает ток, необходимый для горения дуги до тех пор, пока ток достаточной величины не станет.

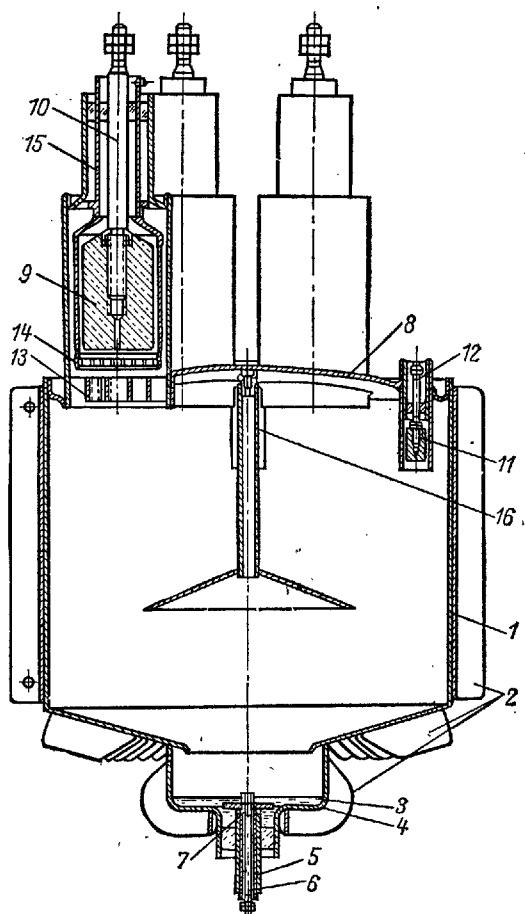


Рис. 15-22. Устройство металлического шестиянодного вентиля с воздушным охлаждением.

проходить через другой анод при изменении знака приложенного анодного напряжения. Таким образом, происходят непрерывное горение дуги и прохождение тока по цепи вторичная обмотка вспомогательного трансформатора — вспомогательный анод — катод — сопротивление r_v — дроссель *Др* — нулевая точка вторичной обмотки вспомогательного трансформатора.

При изменении знака напряжения между анодом и катодом, т. е. при обратном напряжении, между электродами возникает незначительный ток обратного направления.

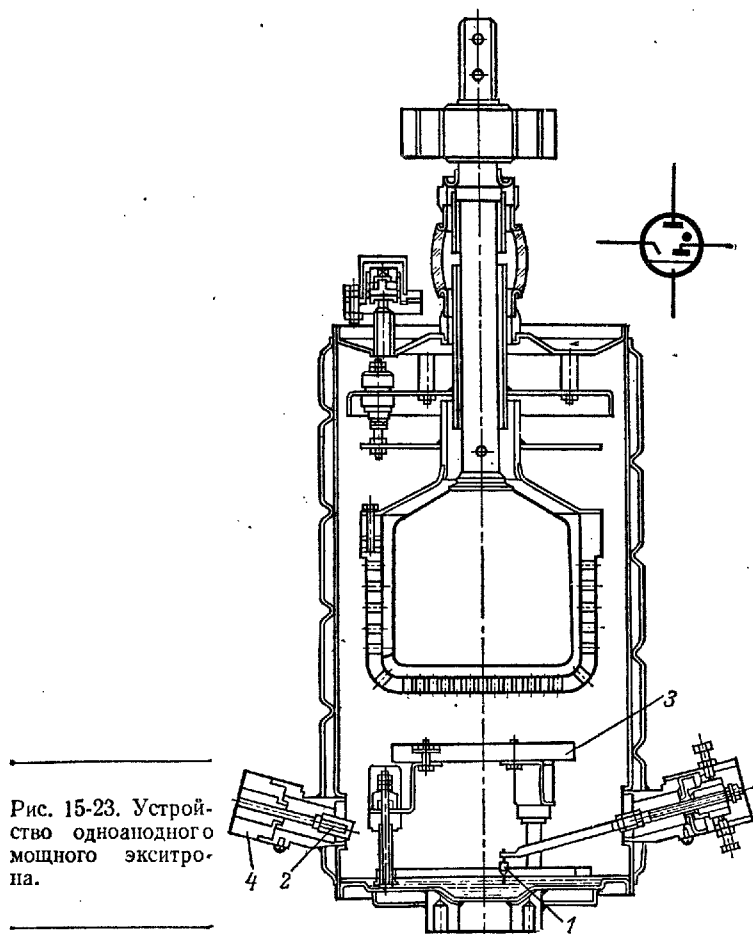


Рис. 15-23. Устройство одноанодного мощного экситро-на.

При включении трехфазного трансформатора и нагрузки R_n дуга возникает между катодом и тем из главных анодов, потенциал которого по отношению к катоду выше, чем двух других. Затем дуга переходит на второй, третий рабочие аноды и т. д. Таким образом, ток проходит через каждый из рабочих анодов только в течение $\frac{1}{3}$ части периода (§ 13-7, в).

Падение напряжения на вентиле обычно невелико (около 20—25 В).

На рис. 15-22 показано устройство металлического шестианодного экситрона с воздушным охлаждением на средний ток 500 А (тип РМ-500).

В корпусе 1 с ребрами 2 для охлаждения в нижней части расположена катодная чаша 3, содержащая ртуть катода 4. Вывод катода 5, вывод зажигающего 6 и зажигающий 7 расположены в нижней части чаши экситрона. На крышке 8 укреплены шесть главных анодов 9 с выводами 10, а также аноды возбуждения 11 с выводами 12. Деионизационный фильтр 13 ограничивает доступ ионов к аноду 9 и управляющей сетке 14 (с выводом 15), позволяющей регулировать момент зажигания. Наконец, экран 16 защищает аноды и сетки от восходящей струи паров ртути.

Устройство одноанодного мощного экситрона типа РМНВ-500 на средний ток 500 А показано на рис. 15-23.

Зажигающим является заостренный полупроводниковый стержень 1 из карбида бора. При импульсе тока через зажигающий на границе соприкосновения его с ртутью возникают небольшие искры, быстро переходящие в дуговой разряд между катодом и анодом. Анод возбуждения 2 представляет собой графитовый стержень, помещающийся в отдельном патрубке 4. Графитовый экран 3 защищает анод от ртутной струи и капель и одновременно служит деионизационным фильтром. Управляющая сетка охватывает анод с нижней и боковых сторон. Водяная рубашка в виде спирального канала в корпусе служит для охлаждения.

в) Игнитрон

На рис. 15-24 показано устройство маломощного металлического игнитрона и его условное графическое обозначение. Корпус 1 представляет собой стальной цилиндр, охлаждаемый водой, проходящей по водяной рубашке. В корпусе расположен графитовый анод 2. Изоляция его выполнена с помощью стеклянного цилиндрического изолятора 3, спаянного с металлом. Катод представляет собой металлическую чашу 4, заполненную до определенного уровня ртутью 5. Зажигающий в виде стержня из карбида бора, расположенный в центре катода, имеет самостоятельный вывод.

Как уже отмечалось, в игнитроне зажигание дуги происходит в начале каждого периода переменного анодного напряжения.

Достоинствами этого вентиля является незначительное падение напряжения, составляющее 15—20 В, что обеспечивает высокий к. п. д. игнитрона, достигающий до 98—99%.

Игнитроны находят применение в мощных выпрямительных устройствах, электросварочных установках и т. д.

15-5. Обозначения газоразрядных приборов

Первый элемент обозначения — буквы, указывающие тип прибора:

СГ — стабилитрон;

ТГ — тиратрон с газовым наполнением;

ТР — тиратрон с ртутным наполнением;

ТГР — тиратрон со смешанным наполнением;

ТХ — тиратрон тлеющего разряда;

ГГР — газотрон со смешанным наполнением;

ГХ — газотрон тлеющего разряда.

ГГ — газотрон с газовым наполнением;

ГР — газотрон с ртутным наполнением;

И — игнитрон;

Э — экситрон;

ИИ — индикатор тлеющего разряда (неоновые лампы);

СН — сигнальные (неоновые) лампы.

Второй элемент обозначения — число, указывающее порядковый номер типа прибора.

Третий элемент обозначения:

а) для тиратронов маломощных, тлеющего разряда, стабилитронов — буква, указывающая на конструктив-

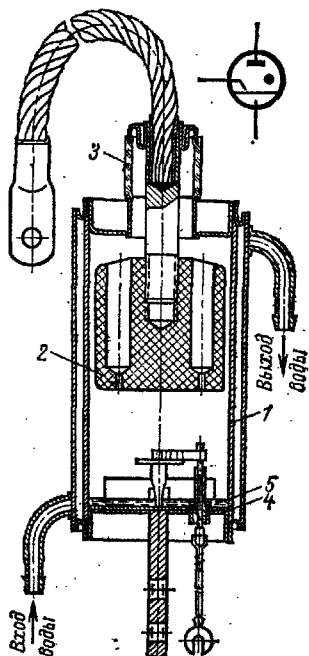


Рис. 15-24. Устройство маломощного металлического игнитрона и его условное обозначение.

ное оформление баллона (как у приемно-усилительных ламп);

б) для газотронов, игнитронов, экситронов — дробное число, числитель которого указывает среднее значение тока в амперах, а знаменатель — амплитудное значение обратного напряжения в киловольтах.

Например: ИН-1 — индикаторная неоновая лампа, первого типа.

СГ-ЗС — стабилитрон, третьего типа, в стеклянном баллоне диаметром более 22,5 мм.

ТГ1-0,1/0,3 — тиратрон с газовым наполнением, первого типа, среднее значение тока 0,1 А, амплитудное значение обратного напряжения 0,3 кВ.

Э1-10/1,5 — экситрон, первого типа (одноанодный, металлический баллон), среднее значение тока 10 А; допустимое обратное напряжение 1,5 кВ.

15-6. Лабораторная работа. Снятие анодно-сеточных и пусковых характеристик тиратрона

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с содержанием § 15-3, г.

П л а н р а б о т ы

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их основные технические данные, в том числе для указанного руководителем тиратрона его основные параметры: максимальное значение анодного тока, среднее значение анодного тока, напряжение горения, напряжение обратного зажигания и др.

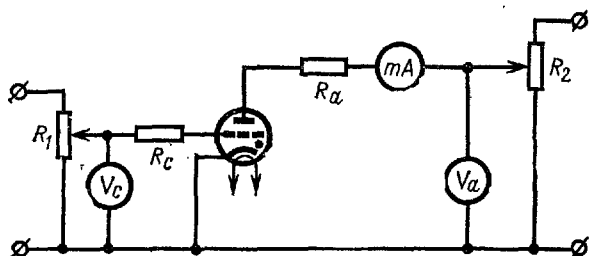


Рис. 15-25. Схема соединения для снятия характеристик тиратрона.

2. Собрать схему (рис. 15-25) и показать ее руководителю.

Допустим, задан тиратрон ТГ1-0,1/0,3.

3. После разогрева нити накала установить реостатом в цепи сетки наибольшее отрицательное сеточное напряжение. Реостатом в анодной цепи установить напряжение $U_a = 100$ В, и уменьшая отри-

пательное напряжение на сетке до момента зажигания тиратрона, замечать (записывать) сеточные напряжения и соответствующие им значения тока в табл. 15-2.

Таблица 15-2

№ наблюдений	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$U_c, В$	-30	-26	-22	-18	-14	-10	-6	0	6	10	14	18	22	26	30
$I_a, мА$															

Затем, изменяя напряжение на сетке, убедиться в том, что анодный ток остается неизменным.

Опыт повторить при других значениях анодного напряжения.

4. По полученным данным построить графики анодно-сеточных характеристик, т. е. $I_a = f(U_c)$ при $U_a = \text{const}$.

5. Реостатом в анодной цепи установить анодное напряжение, равное нулю. Реостатом в цепи сетки установить наибольшее отрицательное значение сеточного напряжения, увеличивая анодное напряжение, заметить значение его, соответствующее зажиганию тиратрона. Повторить опыт при других значениях сеточного напряжения (указанных в табл. 15-3). Ввиду нестабильности зажигания тиратрона каждое наблюдение и запись его следует произвести 3 раза, находя среднее значение анодного напряжения.

Таблица 15-3

№ наблюдений	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_c, В$	-4	-6	-9	-12	-15	-18	-21	-24
$U_{a.3}, В$	1							
	2							
	3							
	Среднее							

Наблюдения записать в табл. 15-3.

6. По полученным данным построить пусковую характеристику тиратрона, т. е. $U_{a.3} = f(U_c)$.

Электронные генераторы. Осциллографы

16-1. Генераторы синусоидальных напряжений

Переменные токи высокой частоты применяются в устройствах радиосвязи, для некоторых медицинских аппаратов и в промышленных установках для нагревания металлов и диэлектриков.

Переменные токи высокой частоты получают преимущественно от ламповых генераторов.

Л а м п о в ы м г е н е р а т о р о м называется устройство, предназначенное для преобразования электрической энергии постоянного тока в электрическую энергию переменного тока заданной частоты с помощью электронных ламп.

По способу получения колебаний, или, как говорят, по способу возбуждения, ламповые генераторы делятся на генераторы с независимым возбуждением и генераторы с самовозбуждением. У первых из них напряжение заданной частоты подается на вход от независимого (постороннего) источника переменного напряжения, так что по существу эти генераторы являются усилителями колебаний переменного тока. У вторых, т. е. у генераторов с самовозбуждением, незатухающие колебания возникают за счет воздействия выходной цепи генератора на его входную цепь через положительную обратную связь.

Генераторы в зависимости от характера цепи, в которой создаются колебания, можно разделить на генераторы с колебательным контуром типа LC и генераторы без колебательного контура — типа RC .

а) Генераторы типа LC

В ламповом генераторе энергия источника постоянного тока преобразуется в энергию переменного тока высокой частоты, которая, как показано в § 6-8, определяется параметрами колебательного контура LC . Электронная лампа в этом процессе преобразования энергии является регулятором, при посредстве которого энергия периодически вводится в колебательный контур, откуда она передается и в нагрузочную цепь.

Одна из возможных схем лампового генератора дана на рис. 16-1.

При включении источника анодного напряжения E_a конденсатор C колебательного контура зарядится до напряжения U_{cm} . После этого конденсатор начнет разряжаться на катушку L колебательного контура и в контуре возникнут колебания (§ 6-8) с собственной частотой $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$. Катушка обратной связи L_1 соединена с сеткой лампы, поэтому напряжение на сетке будет определяться индуктированной в катушке L_1 э. д. с., имеющей частоту ω_0 .

Для самовозбуждения генератора и для получения незатухающих колебаний необходимо выполнить два условия: 1) напряжение, подаваемое на сетку лампы от катушки обратной связи, должно быть сдвинуто по фазе на 180° относительно переменной составляющей анодного напряжения, т. е. обратная связь должна быть положительной; 2) обратная связь должна быть достаточно сильной, с тем чтобы переменная составляющая анодного тока была достаточной для компенсации потерь в контуре. При выполнении указанных условий в анодной цепи лампы возникает пульсирующий ток i_a (рис. 14-36, а), характер которого зависит от напряжения смещения E_c . Постоянная составляющая тока I_{a0} не может попасть в колебательный контур, так как этому мешает разделительный конденсатор C_p , и она замыкается через источник питания и разделительную катушку L_p . Переменная составляющая анодного тока $I_{a.m} \sin \omega_0 t$ при высокой частоте не может попасть в источник питания из-за большого реактивного сопротивления разделительной катушки $\omega_0 L_p$ и она проходит через колебательный контур. Так как она совпадает по фазе с напряжением колебательного контура, то обеспечивается периодическая передача энергии этому контуру.

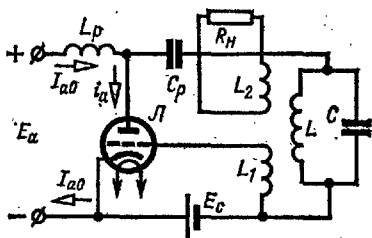


Рис. 16-1. Схема лампового генератора типа LC.

Цепь нагрузки состоит из потребителя R_n (рис. 16-1) и катушки L_2 , индуктивно связанной с катушкой L колебательного контура. Таким образом, энергия из колебательного контура к потребителю передается через посредство магнитного потока, пронизывающего катушки взаимной индукции L_2 и L .

Цепь нагрузки состоит из потребителя R_n (рис. 16-1) и катушки L_2 , индуктивно связанной с катушкой L колебательного контура. Таким образом, энергия из колебательного контура к потребителю передается через посредство магнитного потока, пронизывающего катушки взаимной индукции L_2 и L .

6) Генераторы типа RC

Ламповые генераторы типа LC применяются преимущественно при частотах выше 20 кГц. Для получения более низких частот чаще пользуются более простыми,

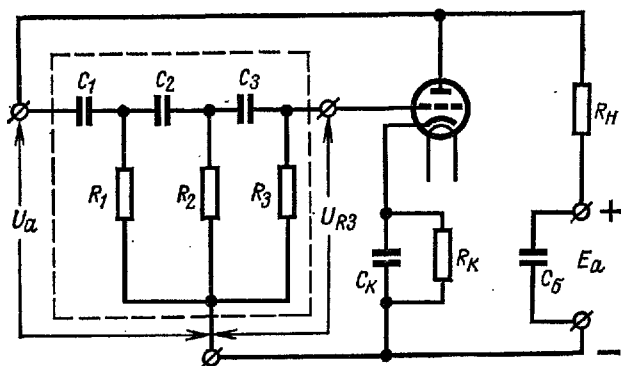


Рис. 16-2. Схема генератора типа RC.

дешевыми и удобными в эксплуатации генераторами типа RC (рис. 16-2), у которых взамен колебательного контура используется сопротивление нагрузки R_H , а обратная связь выполняется при помощи цепочки, состоящей из резисторов R и конденсаторов C .

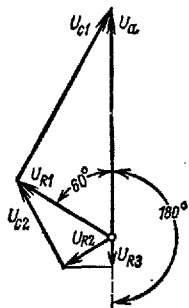


Рис. 16-3. Векторная диаграмма напряжений для трех звеньев RC.

Рассмотрим упрощенную векторную диаграмму напряжений цепочки, состоящей из трех сопротивлений R и трех емкостей C (рис. 16-3). Для упрощения допустим, что током в каждом последующем звене RC можно пренебречь по сравнению с током в предыдущем звене. При указанной оговорке анодное напряжение U_a , приложенное к звену R_1C_1 , состоит из двух слагающих напряжений: напряжения U_{C1} на емкости C_1 , опережающего ток на угол 90° , и напряжения U_{R1} на сопротивлении R_1 , совпадающего по фазе с током и опережающего по фазе напряжение U_a на некоторый угол φ_1 . Этот угол при некоторых значениях R_1 и X_{C1} может иметь значение 60° .

К активному сопротивлению R_1 присоединено второе звено R_2C_2 , напряжение на активном сопротивлении кото-

рого U_{R_2} также опережает напряжение U_{R_1} на угол $\varphi_2 = 60^\circ$. Аналогично напряжение U_{R_3} опережает U_{R_2} на угол φ_3 . Таким образом, для рассмотренной цепочки при определенной частоте выходное напряжение U_{R_3} находится в противофазе к входному напряжению U_a .

Следовательно, в схеме рис. 16-2 сеточное напряжение $U_c = U_{R_3}$ находится в противофазе с анодным напряжением лампы U_a , т. е. выполнено условие, необходимое для генерирования колебаний. Частота колебаний определяется параметрами цепочки обратной связи:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{6} RC} = \frac{1}{15,4 RC}. \quad (16-1)$$

Изменение частоты требует одновременного изменения всех сопротивлений или всех емкостей цепочки.

Можно доказать, что напряжение на сопротивлении R_3 , приложенное к сетке, составляет $1/29$ часть напряжения на первом звене $R_1 C_1$, т. е. $U_c/U_a = 1/29$. Из сказанного следует, что усилитель должен иметь коэффициент усиления $K \geq 29$.

Колебания получаются синусоидальными только при условии, что коэффициент усиления $K = 29$. При $K > 29$ колебания будут несинусоидальными, а при $K < 29$ колебания прекращаются.

16-2. Зарядка и разряд конденсатора

а) Зарядка конденсатора

Присоединим цепь, состоящую из незаряженного конденсатора емкостью C и резистора с сопротивлением R , к источнику питания с постоянным напряжением U (рис. 16-4).

Так как в момент включения конденсатор еще не заряжен, то напряжение на нем $u_c = 0$. Поэтому в цепи в начальный момент времени ($t = 0$) падение напряжения на сопротивлении R равно U и возникает ток, сила которого

$$i = U/R.$$

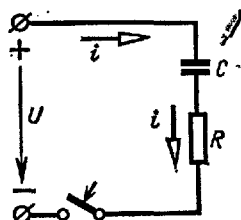


Рис. 16-4. Зарядка конденсатора.

Прохождение тока i сопровождается постепенным накоплением заряда Q на конденсаторе, на нем появляется напряжение $u_c = Q/C$, и падение напряжения на сопро-

тивлении R уменьшается:

$$iR = U - u_C,$$

как и следует из второго закона Кирхгофа. Следовательно, сила тока

$$i = \frac{U - u_C}{R}$$

уменьшается, уменьшается и скорость накопления заряда Q , так как ток в цепи

$$i = dQ/dt. \quad (16-2)$$

С течением времени конденсатор продолжает заряжаться, но заряд Q и напряжение на нем u_C растут все медленнее (рис. 16-5), а сила тока в цепи постепенно уменьшается пропорционально разности напряжений $U - u_C$.

Через достаточно большой интервал времени (теоретически бесконечно большой) напряжение на конденсаторе достигает величины, равной напряжению источника питания, а ток становится равным нулю — процесс зарядки конденсатора заканчивается.

Практически принято считать, что процесс зарядки закончился, когда ток уменьшился

Рис. 16-5. График изменения тока и напряжения при зарядке конденсатора.

до 1% — начального значения U/R , или, что то же, когда напряжение на конденсаторе достигло 99% напряжения источника питания U .

Процесс зарядки конденсатора тем продолжительней, чем больше сопротивление цепи R , ограничивающее силу тока, и чем больше емкость конденсатора C , так как при большой емкости должен накопиться большой заряд. Скорость протекания процесса характеризуют постоянной времени цепи

$$\tau = RC, \quad (16-3)$$

чем больше τ , тем медленнее процесс.

Постоянная времени цепи имеет размерность времени, так как

$$[\tau] = [RC] = \text{Ом} \cdot \text{Кл/В} = \text{Ом} \cdot \text{А} \cdot \text{с/В} = \text{с}.$$

Через интервал времени с момента включения цепи, равный τ , напряжение на конденсаторе достигает примерно 63% напряжения источника питания, а через интервал 5τ процесс зарядки конденсатора можно считать закончившимся.

Напряжение на конденсаторе при зарядке

$$u_C = U - Ue^{-t/\tau} = U(1 - e^{-t/\tau}), \quad (16-4)$$

т. е. оно равно разности постоянного напряжения источника питания и *свободного напряжения* $Ue^{-t/\tau}$, убывающего с течением времени по закону показательной функции от значения U до нуля (рис. 16-5).

Зарядный ток конденсатора

$$i_C = \frac{U}{R} e^{-t/\tau} = Ie^{-t/\tau}. \quad (16-5)$$

Ток i_C от начального значения $I = U/R$ постепенно уменьшается по закону показательной функции (рис. 16-5).

б) Разряд конденсатора

Рассмотрим теперь процесс разряда конденсатора C , который был заряжен от источника питания до напряжения U через резистор с сопротивлением R (рис. 16-6, где переключатель переводится из положения 1 в положение 2). В начальный момент

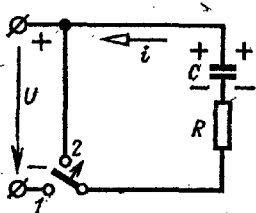


Рис. 16-6. Разряд конденсатора на резистор.

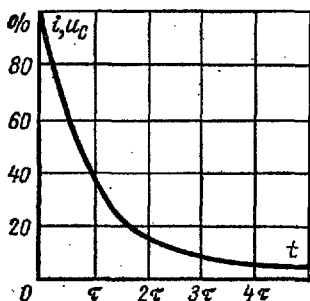


Рис. 16-7. График изменения тока и напряжения при разрядке конденсатора.

в цепи возникнет ток $i = U/R = I$ и конденсатор начнет разряжаться, а напряжение на нем уменьшаться. По мере уменьшения напряжения u_C будет уменьшаться и ток в цепи $i = u_C/R$ (рис. 16-7). Через интервал времени $5\tau = 5RC$ напряжение на конденсаторе и ток цепи уменьшатся при-

мерно до 1% начальных значений и процесс разряда конденсатора можно считать закончившимся.

Напряжение на конденсаторе при разряде

$$u_C = Ue^{-t/\tau}, \quad (16-6)$$

т. е. уменьшается по закону показательной функции (рис. 16-7).

Разрядный ток конденсатора

$$i_C = -\frac{u_C}{R} = -Ie^{-t/\tau},$$

т. е. он, так же как и напряжение, уменьшается по тому же закону (рис. 6-7).

Вся энергия, запасенная при зарядке конденсатора в его электрическом поле, при разряде выделяется в виде тепла в сопротивлении R .

Электрическое поле заряженного конденсатора, отсоединенного от источника питания, не может долго сохраняться неизменным, так как диэлектрик конденсатора и изоляция между его зажимами обладают некоторой проводимостью.

Разряд конденсатора, обусловленный несовершенством диэлектрика и изоляции, называется *саморазрядом*. Постоянная времени при саморазряде конденсатора τ не зависит от формы обкладок и расстояния между ними.

Процессы зарядки и разряда конденсатора называются *переходными процессами*.

16-3. Релаксационные генераторы (генераторы пилообразного напряжения)

Р е л а к с а ц и о н н ы м и называются генераторы периодических несинусоидальных напряжений. Разновидностью релаксационного генератора является генератор пилообразного напряжения.

П и л о о б р а з н ы м называется напряжение, которое сравнительно медленно увеличивается пропорционально времени до своего максимального значения, а затем быстро (почти мгновенно) уменьшается до своего начального значения. На рис. 16-8 показаны идеальная и реальная кривые пилообразного напряжения.

Для получения пилообразного напряжения используются процесс зарядки и непосредственно следующий за ним процесс разряда конденсатора.

Простейший генератор пилообразного напряжения (рис. 16-9) состоит из конденсатора C , неоновой лампы, включенной на его зажимы, и резистора R_a , соединенного последовательно с разветвлением.

Если включить генератор на постоянное напряжение U_a (рис. 16-9), то конденсатор начнет заряжаться через резистор R_a , напряжение на конденсаторе в течение первой части периода T_n (рис. 16-8) будет увеличиваться по известному закону (16-4)

$$u_C = U_a (1 - e^{-t/\tau})$$

до тех пор, пока не достигнет значения U_z — напряжения зажигания неоновой лампы.

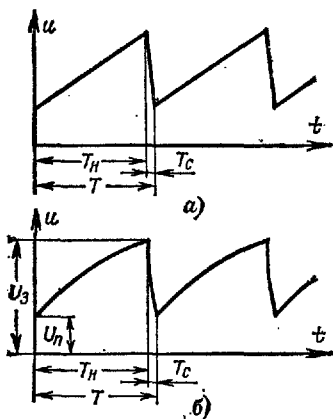


Рис. 16-8. Идеальная (а) и реальная (б) кривые пилообразного напряжения.

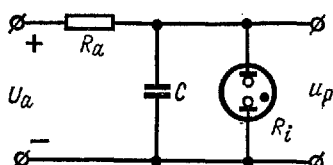


Рис. 16-9. Схема генератора пилообразного напряжения с неоновой лампой.

В этот момент сопротивление лампы резко падает и конденсатор начинает быстро разряжаться через лампу. Напряжение на нем будет уменьшаться (16-6):

$$u_C = U_{cm} e^{-t/\tau}.$$

Когда напряжение u_C упадет до значения U_n — напряжения потухания лампы, сопротивление ее резко возрастет и конденсатор снова начнет заряжаться. Затем процесс периодически будет повторяться.

Постоянная времени $\tau = RC$, как известно, характеризует скорость протекания процесса зарядки и разряда конденсатора. Изменяя постоянную времени, можно изменять и длительность периода пилообразного напряжения, что достигается изменением сопротивления резистора R или емкости конденсатора C либо регулировкой той и другой величины.

Рассмотренный генератор применяется сравнительно редко, так как обладает рядом недостатков, связанных,

в частности, с нестабильностью напряжений зажигания и гашения неоновой лампы, а также недостаточной величиной разности напряжений зажигания и потухания лампы $\Delta U = U_z - U_n$ и др.

Замена неоновой лампы тиратроном или специальными схемами на электронных лампах дает возможность получить более совершенный генератор пилообразного напряжения.

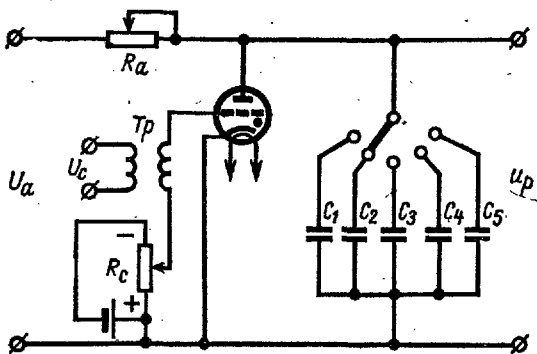


Рис. 16-10. Схема генератора пилообразного напряжения с тиратроном.

Одна из возможных схем генератора с тиратроном дана на рис. 16-10. Замена неоновой лампы тиратроном, обладающим низким (около 15 В) напряжением потухания U_n и дающим возможность напряжением сеточного смещения регулировать напряжение зажигания тиратрона U_z , обеспечивает увеличение амплитуды пилообразного напряжения. Переменное сопротивление резистора R_a дает возможность плавной регулировки периода пилообразного напряжения, а регулируемая емкость (C_1, C_2, C_3 и т. д.) — изменять период пилообразного напряжения в широких границах. Трансформатор Tr в цепи сетки тиратрона дает возможность синхронизировать работу тиратрона с тем или иным источником напряжения, о чем будет сказано в § 16-6.

16-4. Мультивибраторы

Мультивибратором называется электронный генератор импульсов напряжения прямоугольной формы.

В симметричном мультивибраторе (рис. 16-11, а) применяются одинаковые лампы, одинаковые сеточные резис-

сторы $R_1 = R_2$, одинаковые анодные резисторы $R_{a1} = R_{a2}$ и одинаковые конденсаторы $C_1 = C_2$.

В начальный момент времени t_0 (рис. 16-11, б) вторая лампа $\mathcal{L}_2$ открыта, а первая лампа $\mathcal{L}_1$ заперта вследствие большого отрицательного сеточного напряжения U_{c1} . Анодное напряжение U_{a1} на лампе $\mathcal{L}_1$ мало отличается от напряжения источника питания U_a , так как падение напряжения на резисторе R_{a1} , вызванное зарядным током конденсатора C_1 , мало. Напряжение U_a вызывает заряд конденсатора C_1 через резисторы R_{a1} и R_2 . Зарядный ток этого конденсатора создает на резисторе R_2 положительное сеточное

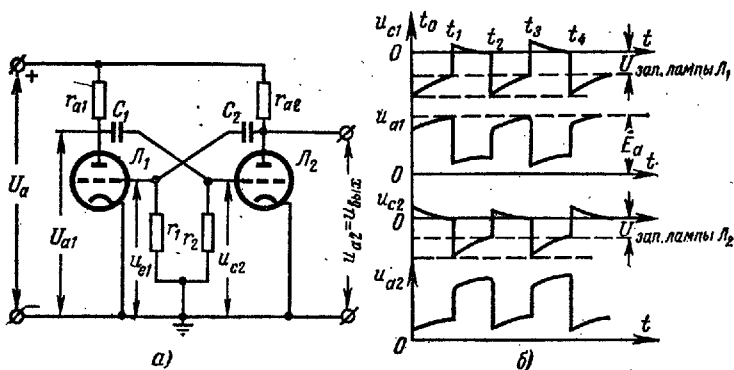


Рис. 16-11. Симметричный мультивибратор (а) и графики его напряжений (б).

напряжение U_{c2} , так что лампа $\mathcal{L}_2$ открыта. Одновременно происходит разряд конденсатора C_2 через лампу $\mathcal{L}_2$ и резистор R_1 . Этот зарядный ток вызывает на резисторе R_1 большое падение напряжения U_{c1} , запирающее лампу $\mathcal{L}_1$. При зарядке конденсатора C_2 сеточное напряжение U_{c1} уменьшается, и в момент времени t_1 лампа $\mathcal{L}_1$ отпирается, а лампа $\mathcal{L}_2$ запирается. При этом напряжение U_{a1} быстро падает.

С момента времени t_1 конденсатор C_2 начнет заряжаться через резисторы R_{a2} и R_1 , при этом зарядный ток создает положительное напряжение U_{c1} , при котором лампа $\mathcal{L}_1$ будет открыта до момента t_2 . В то же время конденсатор C_1 начнет разряжаться через резистор R_2 и лампу $\mathcal{L}_1$, вызывая падение напряжения U_{c2} , запирающее лампу $\mathcal{L}_2$. В момент времени t_1 анодное напряжение U_{a2} скачком увеличивается до значения, близкого к напряжению U_a .

В момент t_2 напряжение u_{c2} уменьшается до значения, при котором лампа L_2 откроется, а лампа L_1 запрется, следовательно, напряжение u_{a1} скачком увеличится, а напряжение u_{a2} уменьшится. Затем процесс начнет повторяться.

При периодическом отпирании и запираии лампы на выходе каждой лампы получаютс я импульсы напряжения примерно прямоугольной формы.

Частота мультивибратора регулируется изменением сопротивлений резисторов R_1 и R_2 или емкостей конденсаторов C_1 и C_2 .

16-5. Электроннолучевые трубки

Электроннолучевой трубкой называется электровакуумный прибор, электронный поток которого, сформированный в электронный луч, используется для преобразования электрических сигналов в световые.

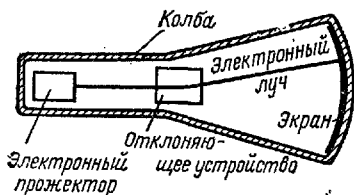


Рис. 16-12. Устройство электроннолучевой трубки.

По своему назначению наиболее распространенные электроннолучевые трубки можно разделить на три основные группы:

Осциллографические трубки, предназначенные для исследования быстро протекающих периодических и аperiodических процессов.

Индикаторные трубки — для регистрации сигналов.

Приемные телевизионные трубки — кинескопы, предназначенные для получения изображения на ее экране.

Электроннолучевая трубка состоит из следующих основных частей:

стеклянной колбы или баллона (рис. 16-12), в котором создается вакуум;

устройства, предназначенного для получения электронного потока и формирования электронного луча и называемого *электронным прожектором*;

отклоняющей системы, предназначенной для перемещения электронного луча по экрану;

экрана трубки, светящегося под воздействием электронного луча.

Рассмотрим устройство одной из электроннолучевых осциллографических трубок с электростатическим управлением (рис. 16-13).

Стеклопый баллон трубки имеет форму колбы, в которой создается высокий вакуум.

Электронный прожектор трубки состоит из подогревного оксидного катода K , управляющего электрода или

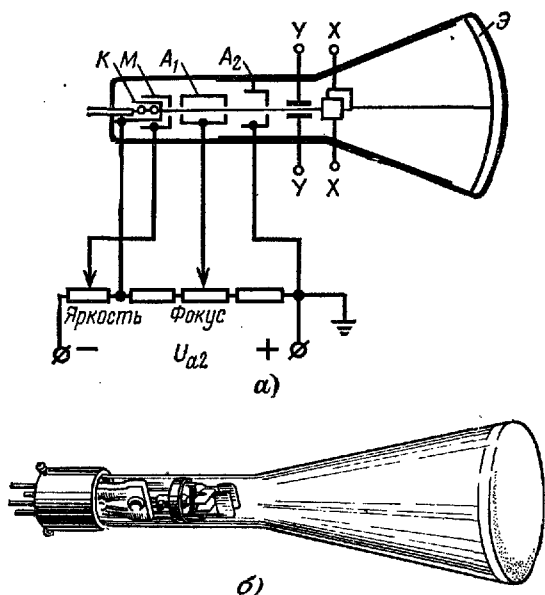


Рис. 16-13. Осциллографическая трубка.

a — система электродов и их питание; b — внешний вид.

модулятора M и системы электродов, фокусирующих электронный луч на экран. Катод (рис. 16-14) имеет вольфрамовый подогреватель 1 , расположенный внутри никелевого цилиндра 2 , на торцевой части которого 3 с наружной стороны нанесен оксидный слой 4 , чем достигается излучение электронов в одном направлении.

Катод окружен модулятором M (рис. 16-13) — цилиндрическим электродом с отверстием в торце. Он служит для регулирования количества электронов в луче и для его начального формирования. Он имеет небольшой отрицательный потенциал относительно катода. Электроны, вылетевшие из катода, например из точки a в направлении aa'

(рис. 16-15, а), под действием электрического поля между катодом и модулятором изменяют свое направление и будут перемещаться в направлении $бв$, т. е. электроны будут отклоняться электрическим полем к оси луча. Если увеличить отрицательный потенциал модулятора, то часть электронов получит еще большее отклонение и не пройдет через отверстие. Таким образом, изменяя потенциал модулятора, можно регулировать количество электронов в луче, т. е. яркость пятна на экране.

Пройдя модулятор, электроны опять будут отклоняться от оси луча. Дальнейшая фокусировка луча выполняется анодами A_1 и A_2 (рис. 16-15, б). Первый анод — цилиндриче-



Рис. 16-14.
Катод осциллографической трубки.

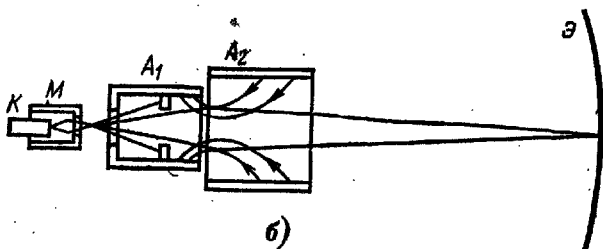
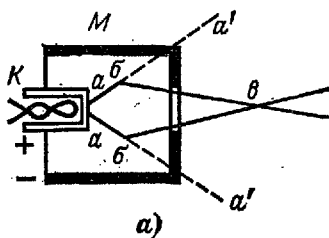


Рис. 16-15. Катод с модулятором.

$а$ — ход луча в электроннолучевой трубке; $б$ — фокусировка электронного луча.

ский с двумя или тремя диафрагмами, второй — также цилиндрический с одной диафрагмой или без нее. Оба анода имеют положительные потенциалы относительно катода, первый из них 0,2—0,5 кВ, а второй 1—2 кВ. Электроны, попавшие в электрическое поле, созданное между двумя анодами, отклоняются им в направлении к оси луча и получают ускорение в направлении движения. Следовательно, поле между анодами действует на электронный луч как собирающая линза, фокусируя его в точке, лежащей на

оси трубки вблизи экрана Э или на самом экране (рис. 16-15, б). В этом случае на экране будет видно очень маленькое светящееся пятно (точка). Фокусировка луча производится регулировкой потенциала первого анода.

Электронный луч, попадая на экран, отдает ему свою энергию, которая частично превращается в световую, частично передается электронам экрана, вызывая вторичную эмиссию. Вторичные электроны улавливаются проводящим графитовым слоем (*аквадагом*), покрывающим частично внутреннюю цилиндрическую и коническую части колбы и соединенным со вторым анодом (рис. 16-13, а).

Отклоняющая система, как отмечалось выше, предназначена для перемещения электронного луча по экрану. Она состоит из двух пар металлических пластин, расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 16-13).

Первая пара пластин УУ, предназначенная для отклонения электронного луча в вертикальной плоскости, называется *вертикально отклоняющей*. Вторая пара пластин ХХ, предназначенная для отклонения луча в горизонтальной плоскости, называется *горизонтально отклоняющей*.

Воздействуя на электронный луч электрическим полем, расположенным между пластинами, получим его отклонения. Допустим, электронный луч совпадает с осью трубки, в чем можно убедиться по светящейся точке в центре экрана. Приложив к отклоняющим пластинам (рис. 16-16) постоянное напряжение U , получим между ними электрическое поле, которое вызовет отклонение луча и он встретится с экраном уже в другой точке, отстоящей от осевой линии на расстоянии

$$h = 0,5 \frac{U}{U_a} \frac{l}{b} \left(L + \frac{l}{2} \right) \approx 0,5 \frac{U}{U_a} \frac{l}{b} L,$$

где U_a — анодное напряжение.

Отклонение электронного луча на экране при изменении напряжения на отклоняющих пластинах на 1 В называется *чувствительностью трубки к напряжению*:

$$S_U = \frac{h}{U} = 0,5 \frac{Ll}{U_a b}.$$

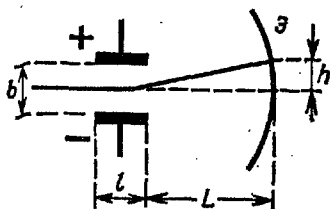


Рис. 16-16. Отклонение электронного луча электрическим полем.

Чувствительность трубок $S_U = 0,2 \div 0,6$ мм/В.

Э к р а н т р у б к и. Свойство вещества светиться под действием электронной бомбардировки называется *катодолуминесценцией*, а вещество, обладающее указанным свойством — *катодолуминофором* (люминофором). Для экранов, предназначенных для визуальных наблюдений, наиболее часто применяют *виллемит*, представляющий собой силикат цинка Zn_2SiO_4 , активированный марганцем, дающий желто-зеленый цвет свечения. Для фотографирования осциллограмм-изображений на экране применяются люминофоры с голубым или синим свечением, например вольфрамат кальция $CaWO_4$.

Важным свойством люминофора является *длительность послесвечения* их, т. е. время, в течение которого яркость свечения уменьшается в 100 раз, считая от момента выключения луча.

Экраны с длительным послесвечением выполняются двухслойными, на стекло наносится слой фотолуминофора (например, сульфид цинка), имеющий длительное послесвечение, а на него — слой катодолуминофора.

Экран осциллографической трубки имеет круглую форму диаметром до 12,5 см, занимая всю поверхность торцевой расширенной части колбы. Свечение экрана наблюдается со стороны, противоположной воздействию электронного луча, так что толщина слоя люминофора должна быть больше глубины проникновения луча, но достаточно малой, чтобы свечение, возбуждаемое электронным лучом, возможно меньше поглощалось при прохождении света через слой люминофора, прилегающий к стеклу.

16-6. Электроннолучевой осциллограф

Э л е к т р о н н о л у ч е в ы м (э л е к т р о н н ы м) о с ц и л л о г р а ф о м называется электронный прибор, предназначенный для записи и визуальных наблюдений кривых, изменяющихся по времени электрических величин — напряжения, тока и др.

Основной частью осциллографа является электронно-лучевая трубка с электростатическим отклонением луча.

Для получения кривой исследуемого напряжения u оно подводится к вертикально отклоняющим пластинам (Y). К горизонтально отклоняющим пластинам (X) подводится напряжение развертки u_p , т. е. пилообразное напряжение,

период которого равен периоду исследуемого напряжения (рис. 16-17) или в целое число раз больше его.

В начальный момент времени t_1 напряжение развертки равно нулю. Затем оно увеличивается пропорционально времени, достигая в конце периода исследуемой величины t_5 своей амплитуды $U_{м.р.}$. Это напряжение при отсутствии исследуемой величины вызовет перемещение электронного луча по экрану с постоянной скоростью по прямой из точки a_1 в точку a_5 .

Если одновременно на электронный луч будет действовать еще и электрическое поле вертикально отклоняющих пластин Y , созданное исследуемым напряжением u , то электронный луч под влиянием этого поля, кроме того, будет

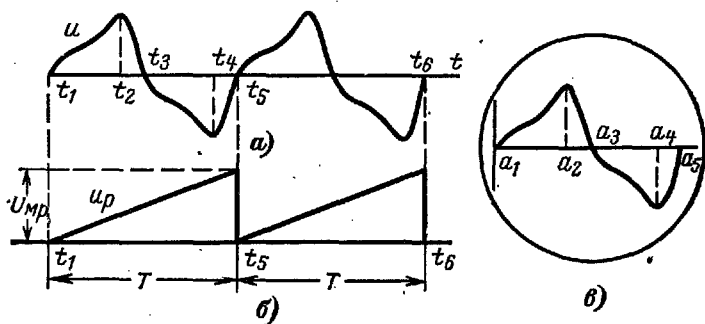


Рис. 16-17. Кривые исследуемого напряжения u и напряжения развертки u_p .

отклоняться по экрану в вертикальном направлении на величину, пропорциональную мгновенному значению исследуемого напряжения. Следовательно, электронный луч в течение периода вычертит на экране кривую исследуемой величины (рис. 16-17, б).

Достигнув своей амплитуды (t_5), вспомогательное напряжение мгновенно падает до нуля и в соответствии с этим электронный луч мгновенно из точки a_5 перемещается по прямой в точку a_1 ; после этого вспомогательное напряжение вновь начинает увеличиваться пропорционально времени, и электронный луч в течение второго и следующих периодов повторяет свое движение.

Световая инерция экрана способствует получению на нем устойчивой кривой исследуемой величины. Однако для получения устойчивой кривой необходимо, чтобы отношение периодов пилообразного и исследуемого напряжений состав-

ляло целое число. Так, например, если это отношение равно n , то на экране будет n периодов исследуемой кривой.

Действительные кривые пилообразного напряжения отличаются от рассмотренной. В частности, спадающая часть кривой бывает не вертикальной, а наклонной, т. е. изменение напряжения от амплитуды его до нуля происходит не мгновенно, а в течение какой-то малой части периода. Это вызывает выпадение из кривой напряжения соответ-

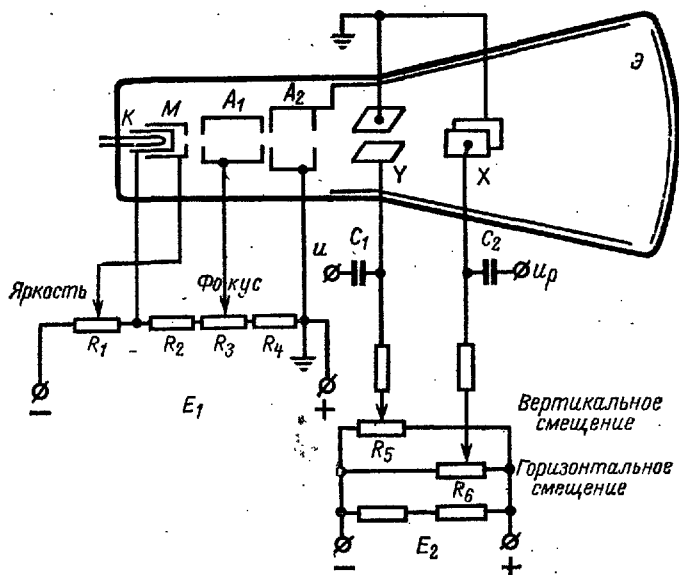


Рис. 16-18. Схема питания осциллографа.

вующей части ее. Обратное движение луча из точки a_5 в точку a_1 происходит значительно быстрее, чем прямое движение его. Кроме того, обратный ход луча гасят и на экране он не виден. Пилообразное напряжение получается от релаксационного генератора, рассмотренного в § 16-3.

Чувствительность обеих пар отклоняющих пластин к напряжению мала, поэтому исследуемое и пилообразное напряжения сначала усиливаются, а затем подводятся к отклоняющим пластинам. Электронные осциллографы имеют два канала усиления: один — для вертикально отклоняющих пластин Y, второй — для горизонтально отклоняющих пластин X. Обычно применяются электронные усилители с несколькими каскадами усиления.

Одна из возможных схем питания осциллографа с электростатическим управлением дана на рис. 16-18.

Питание электродов электронного прожектора производится от источника постоянного напряжения (от выпрямителя) с э. д. с. $E_1 = 1 \div 2$ кВ через делитель напряжения R_1, R_2, R_3, R_4 .

Питание цепей отклоняющих пластин производится от источника постоянного напряжения (от выпрямителя) с э. д. с. $E_2 = 0,2 \div 0,3$ кВ.

Начальная установка светящейся точки на экране производится изменением потенциалов отклоняющих пластин при помощи реостата R_6 (горизонтальное смещение) и R_8 (вертикальное смещение).

Исследуемое напряжение (u) и напряжение развертки (u_p) подводятся к отклоняющим пластинам через разделительные конденсаторы C_1 и C_2 .

Для одновременного исследования двух периодических изменяющихся величин применяются или двухлучевые осциллографы, или специальные электронные коммутаторы. Этот коммутатор производит поочередное включение то одной, то другой исследуемой величины, воздействующей на электронный луч осциллографа, что приводит к получению на экране одновременно двух кривых исследуемых величин.

Электронный осциллограф применяется не только для получения кривых напряжения, но и для измерения ряда электрических величин: напряжения, тока, частоты, $\cos \varphi$, интервалов времени и др. Кроме того, он применяется как нулевой индикатор и в сочетании с измерительными преобразователями — для измерения неэлектрических величин.

Приложив измеряемое напряжение к одной паре отклоняющих пластин осциллографа, получим на экране прямую линию, длина которой пропорциональна удвоенной амплитуде измеряемого напряжения. Измерив длину этой линии и зная постоянную по напряжению при данном режиме работы осциллографа, можно определить амплитуду напряжения.

Для измерения тока к одной паре отклоняющих пластин подводят напряжение, созданное измеряемым током на образцовом сопротивлении. Определив подобно предыдущему амплитуду напряжения и зная образцовое сопротивление, нетрудно по закону Ома определить и амплитуду тока.

Электронно-лучевая трубка с магнитным управлением (рис. 16-19) имеет катод K ,

модулятор M и анод A_1 такого же устройства и назначения, что и у трубки с электростатическим управлением.

Ускорение электронов вдоль оси вызывается полем второго анода A_2 , выполняемого в виде слоя графита на внутренней поверхности цилиндрической и конической частей колбы. Фокусировка луча производится магнитным полем, созданным постоянным током *фокусирующей катушки* ΦK .

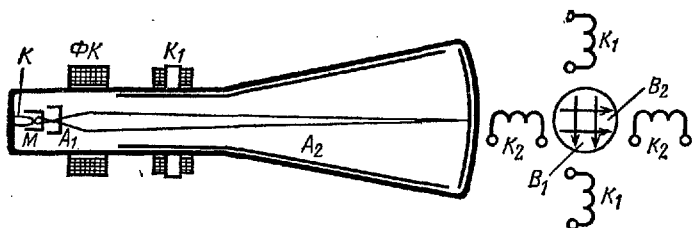


Рис. 16-19. Электроннолучевая трубка с магнитной фокусировкой.

Под действием неоднородного поля внутри этой катушки траектории электронов отклоняются в направлении к оси трубки и фокусируются на экране. Регулировка этой фокусировки производится изменением силы тока в фокусирующей катушке:

Управление отклонением луча производится с помощью двух пар отклоняющих катушек, оси которых расположены взаимно перпендикулярно. Отклоняющие катушки K_1 и K_2 выполняются с ферромагнитным сердечником или без него. Для развертки кривой тока применяется источник напряжения пилообразной формы.

16-7. Обозначения электроннолучевых трубок

Первый элемент обозначения — число, округленно указывающее диаметр (диагональ) экрана в сантиметрах;

Второй элемент обозначения — две буквы, обозначающие тип трубки:

ЛО — осциллографическая трубка, кинескоп с электростатическим отклонением луча;

ЛМ — трубка с электромагнитным отклонением луча;

ЛН — запоминающая трубка;

ЛС — знаковая индикаторная трубка;

ЛНС — запоминающая трубка со знаковой индикацией.

Третий элемент обозначения — число, указывающее порядковый номер типа прибора.

Четвертый элемент обозначения — буква, обозначающая тип экрана:

Р — сине-фиолетовый цвет, среднее послесвечение;

И — желто-зеленый цвет, среднее послесвечение;

У — светло-зеленый цвет, короткое послесвечение;

А — синий цвет, короткое послесвечение;

М — голубой цвет, короткое послесвечение;

В — голубое свечение, желтое длительное послесвечение;

К — розовое свечение, оранжевое длительное послесвечение;

С — оранжевое свечение и длительное послесвечение;

Д — голубое свечение, зеленое длительное послесвечение.

Например: 13ЛЮ5А — осциллографическая трубка с электростатическим отклонением луча, пятого типа с диаметром экрана 13 см, с синим свечением, коротким послесвечением.

16-8. Лабораторная работа.

Экспериментальное определение кривых напряжений в схемах выпрямителей

Перед выполнением лабораторной работы необходимо ознакомиться с содержанием § 13-7, 16-3—16-5.

На рис. 16-20 дана структурная схема осциллографа типа ЭО-7, а на рис. 16-21 — внешний вид его передней части. На передней стенке осциллографа, кроме экрана, укреплена панель управления.

Осциллограф питается от сети переменного тока с напряжением 127 или 220 В и подключается к сети при помощи соединительного шнура.

На панели расположены ручки управления.

Ручкой выключателя 1 (рис. 16-20 и 16-21) производится включение осциллографа в сеть переменного тока: при этом загорается сигнальная лампа Л.

Ручка Яркость 2 связана с движком реостата R_1 (рис. 16-20): при ее повороте изменяется потенциал модулятора и изменяется количество электронов в луче, т. е. изменяется яркость пятна на экране осциллографа.

Ручка Фокус 3 связана с движком реостата R_2 , при ее повороте изменяются потенциал первого анода A_1 и фокусное расстояние.

Ручка Ось Y 4 и ручка Ось X 5 (рис. 16-21) связаны с движками делителей напряжения R_5 и R_6 (рис. 16-18), при помощи которых изменяются потенциалы отклоняющих пластин, и, следовательно, электронный луч изменяет положение на экране, смещаясь соответственно по оси Y или по оси X.

Ручка Ослабление 6а связана с переключателем делителя напряжения, подводимого к усилителю Y. При положении ручки 1:1 на

входные зажимы может быть подано переменное напряжение с действующим значением не более 2,5 В: при положении ручки 1 : 10 напряжение на входных зажимах может быть не более 25 В и при положении ручки 1 : 100 соответственно 250 В.

Ручка *Усиление 6б* связана с движком, изменяющим напряжение, подаваемое на сетку электронной лампы усилителя *У*, выходные зажимы которого соединены с отклоняющими пластинами *У* электронно-лучевой трубки.

Таким образом, с помощью ручек *6а* и *6б* можно в широких пределах изменять отношение между исследуемым напряжением, подведен-

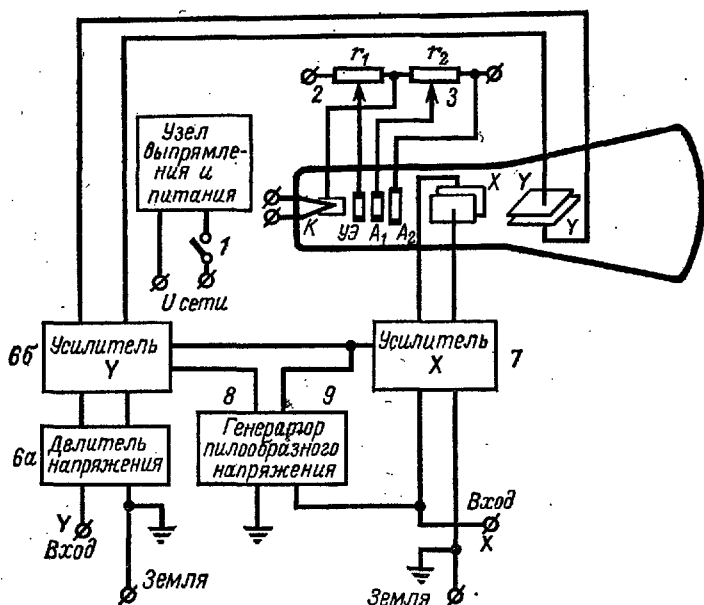


Рис. 16-20. Структурная схема электронного осциллографа ЭО-7.

ным к зажимам *Вход—Земля*, расположенным на левой стороне панели и напряжением на отклоняющих пластинах *У*.

Ручка *Усиление 7* (горизонтальное усиление) связана с движком, изменяющим напряжение, подводимое на сетку электронной лампы усилителя *Х*, выходные зажимы которого соединены с отклоняющими пластинами *Х* электронно-лучевой трубки. Ручкой 7 можно изменять соотношение между напряжением, подведенным к зажимам *Вход—Земля*, расположенным на правой стороне панели, и напряжением на отклоняющих пластинах *Х* (рис. 16-20).

Ручкой *Диапазон частот 8* можно изменить степенями емкость *С* ($C_1 — C_5$) генератора пилообразного напряжения (рис. 16-10), а следовательно, и частоту пилообразного напряжения.

Ручкой *Частота плавно 9* можно изменить сопротивление R_a (рис. 16-10) зарядки конденсатора генератора пилообразного напря-

жения и тем самым скорость зарядки конденсатора C , при этом частота пилообразного напряжения изменяется плавно.

Ручка 10 может быть установлена в три положения: *Внутренняя, От сети и Внешняя.*

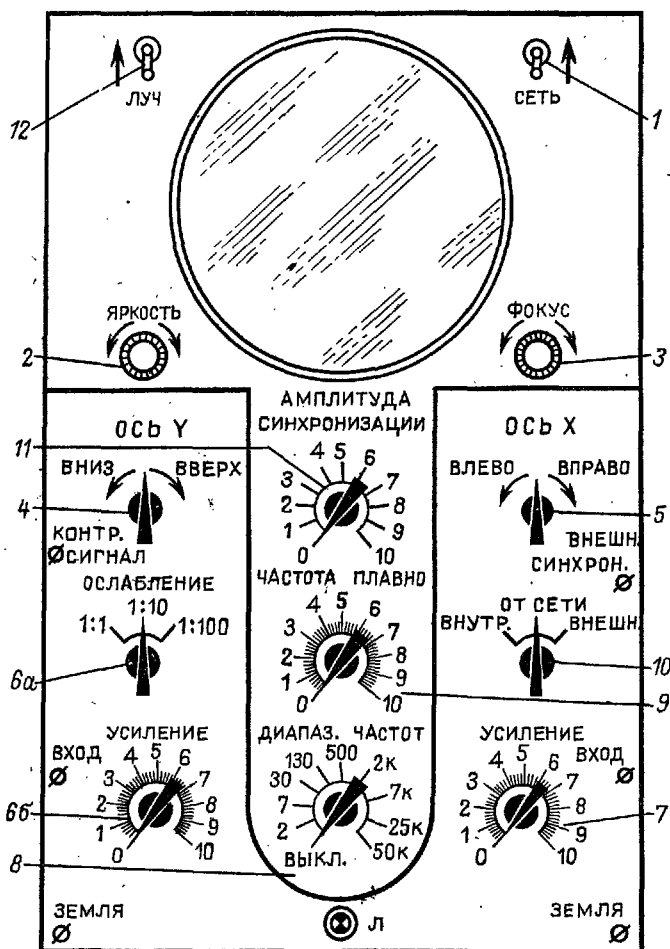


Рис. 16-21. Внешний вид электронного осциллографа ЭО-7.

Для получения неподвижного изображения исследуемого напряжения на экране осциллографа необходимо, чтобы период пилообразного напряжения был в точности равен периоду исследуемого напряжения или в целое число раз больше его. Если периоды напряжения не будут удовлетворять указанному требованию, то изображение кривой на экране будет перемещаться.

Генераторы пилообразного напряжения имеют низкую устойчивость в отношении частоты. Для получения неподвижного изображения необходима синхронизация генератора пилообразного напряжения с исследуемым напряжением или с напряжением какого-либо постороннего источника напряжения, например, с частотой сети, от которой питается осциллограф.

Синхронизирующее напряжение подается на сетку тиратрона генератора пилообразного напряжения через трансформатор Tr_c , вызывая зажигание тиратрона с определенной частотой и тем самым выполняя синхронизацию.

Ручка управления 10 при синхронизации с исследуемым напряжением ставится в положение *Внутренняя*, при синхронизации с напряжением сети, питающей осциллограф, в положение *От сети*, при синхронизации с внешним источником, который должен быть присоединен к зажимам *Внешняя синхронизация*, ручка 10 ставится в положение *Внешняя*.

Ручкой *Амплитуда синхронизации* 11 регулируется амплитуда синхронизирующего напряжения, которое должно быть тем больше, чем больше частота генератора отличается от частоты синхронизирующего напряжения.

Ручка выключателя *Луч* 12 служит для выключения электронного луча. Яркое сфокусированное пятно, вызванное электронным лучом, нельзя оставлять на экране неподвижным во избежание обесцвечивания экрана.

П л а н р а б о т ы

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы, записать их номинальные величины, классы точности, системы, заводские номера, заводы-изготовители и другие данные.

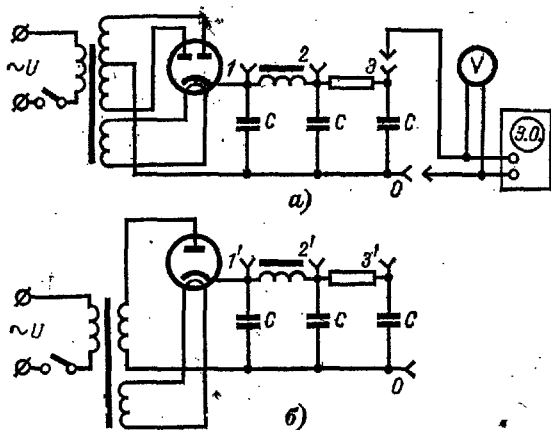


Рис. 16-22. Схемы выпрямителей.

а — двухполупериодного; б — однопериодного.

2. Установить ручки управления осциллографа: 1 — включен; 2, 3, 4, 5 — средние положения; 6а — положение 1 : 100, 6б и 7 — нулевые положения; 8 — положение 30—130; 9 — нулевое положение; 10 — внутренняя; 11 — положение 2—3; 12 — положение «включен».

3. Собрать схемы (рис. 16-22, а и 16-22, б) двухполупериодного и однополупериодного выпрямителей и показать их руководителю для проверки, после чего включить их под напряжение.

4. Присоединить цепь питания осциллографа к сети переменного тока; поворотом ручки выключателя 1 включить его.

5. После появления на экране светового пятна, воздействуя на ручки *Яркость 2* и *Фокус 3*, получить сфокусированное яркое пятно.

6. Пользуясь ручками *Ось Y 4* и *Ось X 5*, установить пятно в центре экрана.

7. Присоединить зажимы осциллографа *Вход* и *Земля*, расположенные с левой стороны панели, к точкам цепи 1—0 (рис. 16-22).

8. Поворотом ручек *ба* и *бб* подобрать достаточное усиление, при котором сумма положительной и отрицательной амплитуд напряжений была бы равна 0,4—0,5 диаметра экрана.

9. Получив на экране устойчивую кривую напряжения U_{01} , зарисовать ее и измерить в миллиметрах максимальную ($h_{\text{макс}}$) и минимальную ($h_{\text{мин}}$) ординаты кривой напряжения и вольтметром измерить среднее значение этого напряжения $U_{0\text{ср}}$.

Повторить выполнение всех заданий, указанных в п. 9, для точек 0—2, 0—3, а затем и для точек 0—1'; 0—2'; 0—3'.

10. По полученным данным определить коэффициенты пульсации (13-32) для указанных выше точек на схемах рис. 16-22, а и б, пользуясь формулой

$$q = \frac{h_{\text{макс}} - h_{\text{мин}}}{h_{\text{макс}} + h_{\text{мин}}}$$

11. Наблюдения и расчеты записать в табл. 16-1.

Таблица 16-1

№ п/п.	Точки схемы	U_V	$h_{\text{макс}}$	$h_{\text{мин}}$	q	№ п/п.	Точки схемы	U_V	$h_{\text{макс}}$	$h_{\text{мин}}$	q
		В	мм	мм	—			В	мм	мм	—
	0—1						0—1'				
	0—2						0—2'				
	0—3						0—3'				

Глава семнадцатая

Полупроводниковые приборы и их применение

17-1. Собственная электропроводность полупроводников

Полупроводниками называются материалы, занимающие промежуточное положение между проводниками и диэлектриками. Удельное объемное электрическое сопротивление проводников лежит в границах

10^{-8} — 10^{-5} Ом·м, полупроводников — 10^{-5} — 10^7 Ом·м, диэлектриков — 10^7 — 10^{16} Ом·м.

Для полупроводников характерна большая зависимость проводимости от температуры, электрического поля, освещенности, сжатия и т. д. В отличие от проводников они имеют не только электронную, но и так называемую дырочную проводимость.

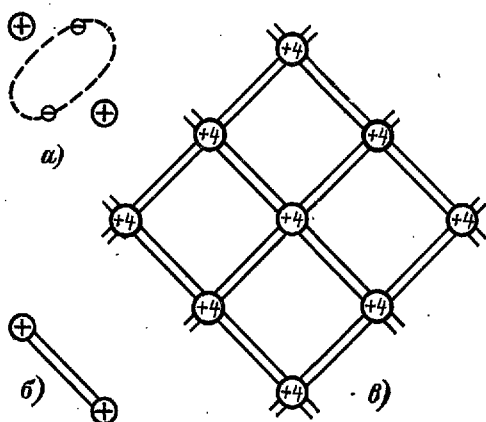


Рис. 17-1. Кристаллическая решетка полупроводника.

а — парноэлектронная (ковалентная) связь атомов; *б* — ее схематическое изображение; *в* — связи в кристаллической решетке германия.

В электронике в качестве полупроводниковых материалов наиболее широко применяются *германий, кремний, арсенид галлия*.

Химическую связь двух соседних атомов, обусловленную образованием общей пары электронов на одной орбите (рис. 17-1, *а*), называют парноэлектронной или *ковалентной*. Она условно изображается двумя линиями, соединяющими атомы (рис. 17-1, *б*). Например, германий принадлежит к элементам четвертой группы периодической системы элементов Менделеева. Следовательно, он имеет на внешней орбите четыре валентных электрона. Каждый атом в кристалле германия образует парноэлектронные связи с четырьмя соседними атомами (рис. 17-1, *в*).

При температуре, близкой к абсолютному нулю, и отсутствии примесей все валентные электроны атомов в кристалле

германия взаимно связаны, свободных электронов нет: следовательно, кристалл не обладает проводимостью. При повышении температуры или при облучении увеличивается энергия части электронов, что приводит к частичному нарушению ковалентных связей и появлению свободных электронов. Германий уже при комнатной температуре становится полупроводником. Под действием внешнего электрического поля свободные электроны перемещаются, обуславливая *электронную проводимость* (*n*-проводимость).

В момент образования свободного электрона в ковалентных связях образуется свободное (вакантное) место — «электронная дырка», так что этот термин указывает на отсутствие одного электрона. При наличии дырки какой-либо из электронов соседней связи может занять место дырки, и нормальная связь в этом месте восстановится; однако нормальная связь нарушается в том месте, откуда убыл электрон; эту новую дырку может занять еще какой-либо электрон и т. д. Под действием внешнего электрического поля происходит перемещение дырок в направлении поля, т. е. в направлении, обратном перемещению электронов. Перемещение дырок эквивалентно перемещению положительных зарядов. Этот процесс называется *дырочной проводимостью* (*p*-проводимостью). Если при электронной проводимости один свободный электрон проходит весь путь в кристалле, то при дырочной проводимости большое количество электронов поочередно замещают друг друга в связях, т. е. имеет место как бы эстафета электронов, при которой каждый электрон проходит свой этап пути. Таким образом, проводимость полупроводника складывается из электронной и дырочной проводимостей.

При нарушении парноэлектронных связей в кристалле одновременно возникает одинаковое число свободных электронов и дырок. Если, с одной стороны, с повышением температуры происходит образование пар «электрон — дырка», с другой стороны, происходит их частичная *рекомбинация*. При заданной температуре число пар в единице объема полупроводника в среднем остается постоянным. Например, при температуре 20°C концентрация электронов и дырок у германия $n \approx 2,5 \cdot 10^{13}$ в 1 см^3 , а у металлических проводников концентрация свободных электронов в 1 см^3 $n \approx 10^{22}—10^{23}$. Таким образом, из сопоставления концентраций следует, что проводимость германия при нормальной температуре значительно меньше проводимости металлов. При повышении температуры число свободных элект-

тронов и дырок сильно возрастает и проводимость германия значительно увеличивается.

Электропроводность полупроводника при отсутствии в нем примесей называется собственной электропроводностью полупроводника.

Полупроводники имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления, который по абсолютной величине в 10—20 раз больше, чем у металлов. При нагревании металла на 1°C его сопротивление увеличивается примерно на 0,4%, а сопротивление полупроводника уменьшается на 4—8%. Это свойство полупроводников используется в технике для различных целей, например для изготовления терморезисторов, величина сопротивления которых резко меняется при незначительных изменениях температуры.

17-2. Примесная электропроводность полупроводников

Свойства полупроводника можно изменить, внеся в него ничтожное количество примеси. Вводя в кристалл полупроводника атомы других элементов, можно получить в кристалле преобладание количества свободных электронов над дырками, или, наоборот, преобладание количества дырок над свободными электронами.

Например, при внесении в основное вещество примесей путем замещения в кристаллической решетке атома германия атомом мышьяка, имеющим пять валентных электронов, четыре электрона мышьяка образуют заполненные связи с соседними атомами германия, а пятый электрон, слабо связанный с атомом мышьяка, превратится в свободный (рис. 17-2, а). Поэтому примесь мышьяка увеличивает электронную проводимость.

При замещении атома германия атомом индия, имеющим три валентных электрона, они вступят в ковалентную связь с тремя атомами германия, а связи с четвертым атомом германия будут отсутствовать, так как у индия нет четвертого электрона (рис. 17-2, б). Восстановление всех связей возможно, если недостающий четвертый электрон будет получен от ближайшего атома германия. Но в этом случае на месте электрона, покинувшего атом германия, появится дырка, которая может быть заполнена электроном из соседнего атома германия. Процесс последовательного заполнения свободной связи эквивалентен движению дырок в

полупроводнике. Таким образом, примесь индия повышает дырочную проводимость кристалла германия.

Полупроводники с преобладанием электронной проводимости называются полупроводниками типа *n* (от латинского слова *negative* — отрицательный), а полупроводники с преобладанием дырочной проводимости — типа *p* (от латинского *positive* — положительный). Носители заряда, определяющие собой вид проводимости в примесном полупроводнике, называются **основными** (электроны в *n*-полупроводнике или дырки в *p*-полупроводнике), а носители

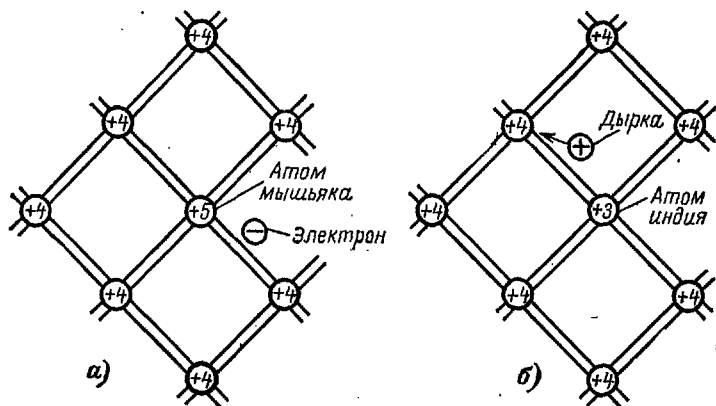


Рис. 17-2. Искривления кристаллической решетки полупроводника.

а — донорная примесь (мышьяк); б — акцепторная примесь (индий).

заряда противоположного знака — **не основными**. Примеси, вызывающие преобладание электронной проводимости, т. е. такие, у которых валентных электронов больше, чем у атома данного полупроводника, называются **донорными**. Примеси, вызывающие преобладание дырочной проводимости, т. е. примеси с меньшим числом валентных электронов в атоме по сравнению с атомом данного полупроводника, называются **акцепторными**. Донорной примесью для германия являются, например, мышьяк, сурьма, фосфор, а акцепторной — индий, галлий, алюминий и др.

В зависимости от процентного содержания примеси проводимость примесного полупроводника возрастает по сравнению с собственной проводимостью полупроводника в десятки и сотни тысяч раз. Например, если в нормальных условиях в 1 см^3 чистого германия содержится примерно $4,2 \cdot 10^{22}$ атомов и $2,5 \cdot 10^{13}$ электронов проводимости и дырок,

то примесь мышьяка в количестве 0,001% вызовет появление в том же объеме дополнительно 10^{17} электронов проводимости, которые обеспечат увеличение электронной проводимости примерно в 10 000 раз.

17-3. Полупроводниковый вентиль

Полупроводниковый вентиль — прибор, представляющий собой контактное соединение двух полупроводников, один из которых с электронной проводимостью, а другой с дырочной (рис. 17-3), например германий типа p и германий типа n .

Вследствие большей концентрации электронов в полупроводнике n по сравнению с полупроводником p будет происходить *диффузия электронов* из первого полупроводника во второй. Аналогично будет происходить *диффузия дырок* в полупроводник n . В тонком пограничном слое полупроводника n возникает положительный объемный заряд, в по-

граничном слое полупроводника p — отрицательный заряд. Между разноименными заряженными слоями возникает разность потенциалов — *потенциальный барьер* — и образуется электрическое поле напряженностью $\mathcal{E}_{пер}$, препятствующее дальнейшей диффузии, которая прекратится при

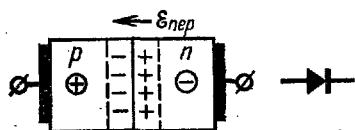


Рис. 17-3. Полупроводниковый вентиль и его условный знак.

равенстве сил электрического поля и сил, вызывающих диффузию. Тонкий пограничный слой, обедненный основными носителями зарядов и обладающий большим сопротивлением, называют *запирающим слоем* или *p - n -переходом*.

Соединив положительный зажим источника питания с металлическим электродом полупроводника p , а отрицательный зажим — с электродом полупроводника n , получим в приборе внешнее электрическое поле $\mathcal{E}_{внеш}$, направленное навстречу полю p - n -перехода; под действием внешнего поля электроны и дырки будут двигаться навстречу друг другу (рис. 17-4). При таком движении электронов и дырок число основных носителей заряда в переходном слое возрастает, а объемный заряд уменьшится, следовательно, уменьшится потенциальный барьер и сопротивление переходного слоя. Таким образом, в цепи установится ток $I_{пр}$.

называемый *прямым*, который будет значительным даже при относительно небольшом напряжении источника питания.

Поменяв присоединение полюсов источника питания к вентилю (рис. 17-5), получим внешнее поле одного направления с полем *p-n*-перехода и, следовательно, *усиливающим* его. Теперь поле еще больше будет препятствовать прохождению основных носителей заряда через запирающий слой. Кроме того, внешнее поле вызовет движение электронов

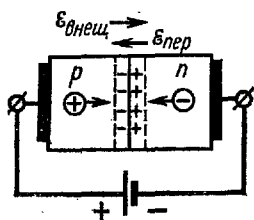


Рис. 17-4. Включение вентиля в прямом направлении.

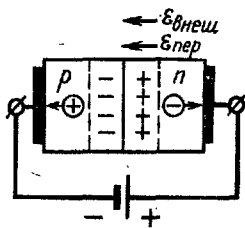


Рис. 17-5. Включение вентиля в обратном направлении.

в *n*-полупроводнике и дырок в *p*-полупроводнике в противоположные стороны от запирающего слоя. Это повлечет за собой увеличение объемного заряда, потенциального барьера и сопротивления запирающего слоя. Ток $I_{обр}$, называемый *обратным*, весьма мал и в ряде практических случаев может считаться равным нулю.

Итак, контактное соединение двух полупроводников с разными проводимостями *обладает явно выраженной односторонней проводимостью, т. е. является вентилям*. Условный знак вентиля показан на рис. 17-3.

Отношение прямого тока к обратному току при одном и том же напряжении называется *коэффициентом выпрямления*:

$$k_v = I_{пр}/I_{обр}. \quad (17-1)$$

17-4. Германиевые и кремниевые диоды

Полупроводниковым диодом или полупроводниковым вентилям называется прибор, предназначенный для преобразования одних электрических величин в другие электрические величины, имеющий электроннодырочный *p-n*-переход. Диод имеет два внешних вывода.

В германиевых и кремниевых диодах используются явления, происходящие в p - n -переходах между областью кристалла германия с p -проводимостью и областью с n -проводимостью. Они изготавливаются *точечными, микроплоскостными и плоскостными*.

Точечный германиевый диод (рис. 17-6) состоит из стеклянного (или металлостеклянного) баллона

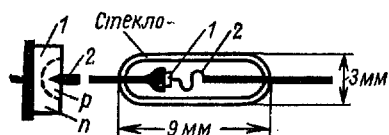


Рис. 17-6. Германиевый точечный вентиль.

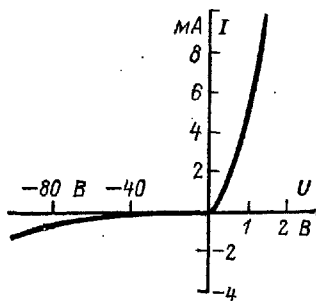


Рис. 17-7. Вольт-амперная характеристика германиевого точечного вентиля.

диаметром около 3 и длиной 9 мм, в который впаяны два проводниковых вывода, на конце одного из них укреплен кристалл германия 1 с n -проводимостью, на конце другого — тонкая заостренная проволочка — игла 2 из индия. Запирающий слой (p - n -переход) образуется в процессе формовки диода при пропускании импульсов тока, под действием

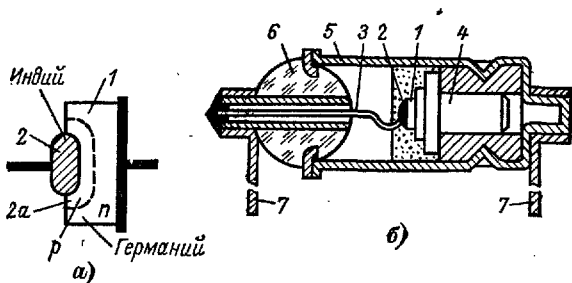


Рис. 17-8. Германиевый плоскостной вентиль типа Д-7.

которых атомы индия диффундируют в кристалл германия, образуя в нем полусферическую область (рис. 17-6) с дырочной проводимостью. Наибольший прямой ток этого вентиля 16 мА, максимальное допустимое обратное напряжение 50 В. Вольт-амперная характеристика вентиля показана на рис. 17-7.

Микроплоскостные диоды отличаются от точечных несколько большей поверхностью p - n -перехода.

Плоскостной вентиль (рис. 17-8, а) состоит из пластины германия 1 с примесью мышьяка или сурьмы, имеющей электронную проводимость, и индиевой таблетки 2. При изготовлении диода они нагреваются до температуры около 500°C , при которой таблетка индия плавится, ее атомы диффундируют в германий, образуя область 2а (рис. 17-8, а) с дырочной проводимостью. На границе двух областей и создается p - n -переход.

На рис. 17-8, б показано устройство одного из плоскостных германиевых диодов. В металлическом корпусе 5 укреплен проводник 4 с рас-

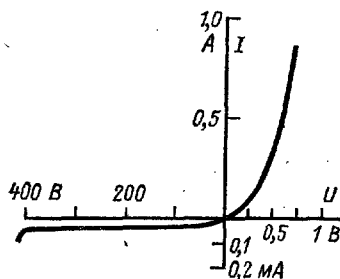


Рис. 17-9. Вольт-амперная характеристика плоскостного вентиля.

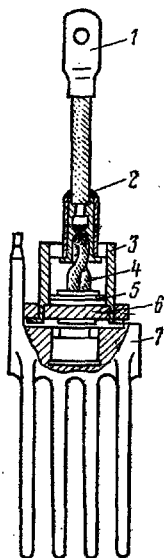


Рис. 17-10. Кремниевый диод типа ВК-100.

положенным на конце кристаллом германия 1. Электрод 2 из индия соединен с одним из выводов 7 проводником 3, проходящим через изолятор 6. Выпрямленный наибольший ток вентиля 300 мА, максимальное допустимое обратное напряжение 50 В. На рис. 17-9 дана вольт-амперная характеристика плоскостного вентиля.

Германиевые диоды допускают плотность тока до 100 А/см^2 при прямом напряжении до 0,8 В. Рабочая температура $-60 \dots +75^{\circ}\text{C}$.

Выпрямительные кремниевые диоды изготавливаются сплавлением алюминия в кремний n -типа. У этих диодов плотность тока доходит до 200 А/см^2 при прямом напряжении до 1—1,2 В. Рабочий ток до 1 000 А, допустимое обратное

напряжение обычно 700—800 В, иногда более 1 000 В. В кремниевых вентилях обратный ток на несколько порядков меньше, чем у германиевых. Рабочая температура —60 — +150° С. На рис. 17-10 показан кремниевый диод типа ВК-100 с воздушным охлаждением на номинальный ток 100 А.

17-5. Меднозакисные и селеновые диоды

Меднозакисный вентиль (рис. 17-11) состоит из медного диска 1, на который наносится слой закиси меди 2. К последнему прилегает для получения хорошего контакта свинцовый диск 3, а за ним расположен тонкий большого диаметра латунный диск 4 — радиаторный, предназначенный для отвода тепла. Слой закиси меди (CuO_2) получается

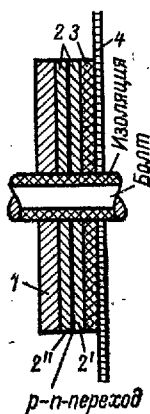


Рис. 17-11. Устройство меднозакисного вентиля.

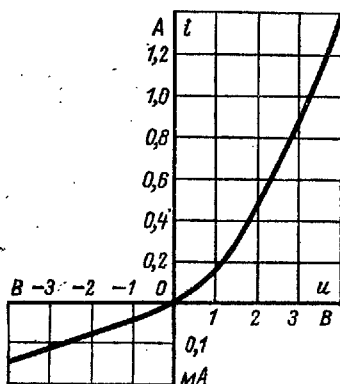


Рис. 17-12. Вольт-амперная характеристика меднозакисного вентиля.

при термической обработке меди и в атмосфере кислорода. Наружный слой закиси меди 2', полученный при избытке кислорода, обладает p -проводимостью. Слой закиси 2'', прилегающий к медной шайбе, полученный при недостатке кислорода, обладает n -проводимостью. Между двумя слоями закиси меди возникает p - n -переход.

Допустимое напряжение на вентиле не более 10 В, так как при обратном напряжении 20—30 В он пробивается. Для выпрямления при больших напряжениях несколько вентилях монтируются на болте, образуя столбик выпря-

мителя. Для улучшения охлаждения устанавливаются радиаторные шайбы с тем, чтобы температура не поднималась выше $+60^{\circ}\text{C}$, так как иначе прибор может потерять вентильные свойства. Меднозакисные вентили допускают плотность тока $0,1\text{ А/см}^2$. Вольт-амперная характеристика вентилей дана на рис. 17-12.

Селеновый вентиль (рис. 17-13) состоит из алюминиевого или стального диска 1, покрытого с одной стороны полупроводящим слоем кристаллического селена 2', обладающего дырочной проводимостью, который служит одним электродом. Другим электродом 2'' служит нанесенный на селен слой сплава кадмия и олова, при диффузии из которого атомов кадмия в селен и образуется слой, обладающий электронной проводимостью. Таким образом, запирающий слой 3 образуется между кристаллическим селеном и селеном с примесью кадмия. К электроду 2'' прилегает пружинящая шайба 4.

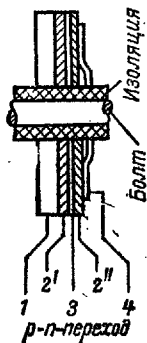


Рис. 17-13. Селеновый вентиль.

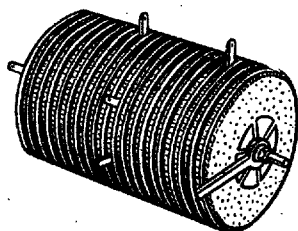


Рис. 17-14. Столбик селенового вентиля.

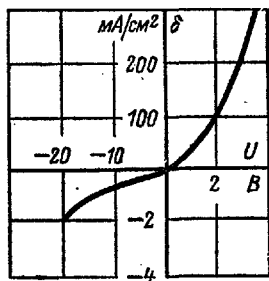


Рис. 17-15. Вольт-амперная характеристика селенового вентиля.

Допустимое напряжение на селеновый вентиль составляет 20—40 В, при обратном напряжении 60—80 В вентиль пробивается. Рабочая температура не должна превышать $+75^{\circ}\text{C}$, плотность тока $0,1—0,2\text{ А/см}^2$. На рис. 17-14 показан столбик селенового вентиля, на рис. 17-15 — вольт-амперная характеристика одного вентиля.

По назначению диоды делятся на две группы: диоды, предназначенные для выпрямления переменного тока промышленной частоты, и диоды для преобразования высоко-

17-6. Применение полупроводниковых вентилей и схемы выпрямителей

По назначению диоды делятся на две группы: диоды, предназначенные для выпрямления переменного тока промышленной частоты, и диоды для преобразования высоко-

кочастотных сигналов в сигналы низкой частоты, т. е. для *детектирования*.

Кроме германиевых и кремниевых вентилях (последние получили преимущественное распространение в установках преобразования больших токов) промышленность продолжает выпускать вентили и более ранних конструкций — селеновые и меднозакисные. Это объясняется тем, что они, обладая меньшими плотностями тока и меньшими обратными



Рис. 17-16. Однополупериодное выпрямление.

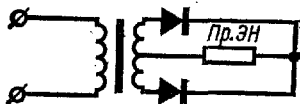


Рис. 17-17. Двухполупериодное выпрямление.

напряжениями, просты в изготовлении, дешевы и находят себе применение в ряде областей: селеновые зарядные установки, гальванические и электролитические установки относительно небольшой мощности.

Меднозакисные вентили применяются в измерительной технике вследствие стабильности их параметров, а также для питания электролизных ванн при напряжении 4—6 В.

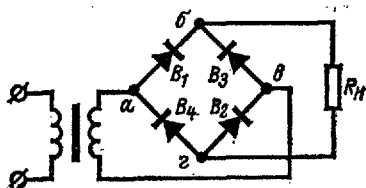


Рис. 17-18. Мостовой двухполупериодный выпрямитель.

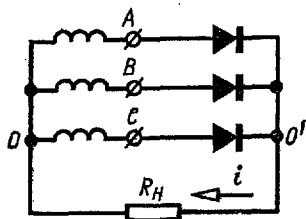


Рис. 17-19. Схема трехфазного выпрямителя.

Схемы выпрямления с применением полупроводниковых вентилях по существу остаются теми же, что и рассмотренные в § 13-7 для кенотронов. В этом легко убедиться, сравнивая схемы рис. 17-16 и 13-27, рис. 17-17 и 13-28, рис. 17-18 и 13-29, а также рис. 17-19 и 13-30.

В связи с аналогией в схемах все сказанное в § 13-7 о выпрямителях с кенотронами остается справедливым и для выпрямителей с полупроводниковыми диодами. То же можно сказать и в отношении фильтров.

17-7. Обозначения полупроводниковых диодов

Обозначение полупроводникового диода состоит из пяти элементов: 1-й элемент обозначения — буква, указывающая исходный материал диода: Г — германий, К — кремний, А — арсенид галлия;

2-й элемент обозначения — буква, указывающая тип прибора: Д — диод;

3-й элемент обозначения — число, указывающее назначение прибора: 1 — диод малой мощности со средним значением тока до 0,3 А; 2 — диод средней мощности со средним значением тока 0,3—10 А; 3 — диод большой мощности со средним значением тока более 10 А;

4-й элемент обозначения — число, указывающее порядковый номер разработки прибора (от 1 до 99);

5-й элемент обозначения — буква, обозначающая деление технологического типа на группы (от А до Я).

Например: ГД112А — германиевый выпрямительный диод малой мощности, номер разработки 12, группа А; КД210Б — кремниевый диод средней мощности, номер разработки 10, группа Б.

17-8. Кремниевые стабилитроны (опорные диоды)

Плоскостные кремниевые диоды, предназначенные для стабилизации постоянного напряжения или для получения опорного (образцового неизменного) напряжения, называются кремниевыми стабилитронами, опорными диодами. Они представляют собой разновидность кремниевых диодов с повышенной концентрацией носителей зарядов в полупроводниках.

Для кремниевых стабилитронов рабочим участком вольт-амперной характеристики является та часть ее, которая соответствует обратному току, обратному напряжению и расположена параллельно оси тока (на рис. 17-20 показана сплошной линией).

Предельная сила тока стабилитрона $I_{\text{ст. макс}}$ определяется допустимой мощностью рассеяния

$$I_{\text{ст. макс}} = P_{\text{макс}} / U_{\text{обр}} \quad (17-2)$$

и ограничивается балластным сопротивлением R_6 .

Максимальный ток стабилитронов различных типов колеблется от 20 мА до 2 А. Номинальные напряжения

6—100 В. Дифференциальное обратное сопротивление различных типов составляет 20—50 Ом.

Из схемы стабилизатора напряжения с кремниевым стабилитроном (рис. 17-21) видно, что нагрузка присоединяется параллельно стабилитрону, а в неразветвленной части цепи включается балластное сопротивление R_6 . Стабилитрон включается в непереводящем направлении.

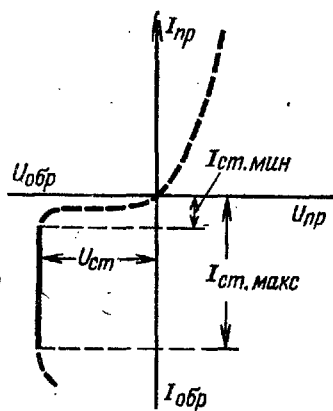


Рис. 17-20. Вольт-амперная характеристика кремниевого стабилитрона.

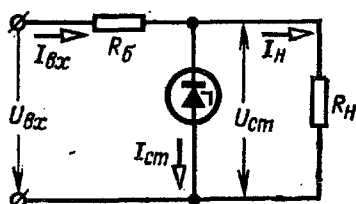


Рис. 17-21. Схема стабилизатора с кремниевым стабилитроном.

17.9. Транзисторы

Полупроводниковым триодом или транзистором называется электропреобразовательный полупроводниковый прибор с двумя p - n -переходами, имеющий три проводниковых вывода, пригодный для усиления мощности.

Полупроводниковые триоды широко применяются в качестве усилителей.

Полупроводниковый триод состоит из тонкой пластинки германия 2 (рис. 17-22, а) с электронной (n) проводимостью, с противоположных сторон которой вплавлены две таблетки индия. Индий, диффундируя в германий, образует две области (1 и 3) с дырочной (p) проводимостью. Толщина области с n проводимостью составляет несколько микрон или несколько десятков микрон. Смежные области, отделенные друг от друга p - n -переходами, называются эмиттер Э, база Б (или основание) и коллектор К (рис. 17-22, б и в).

Допустим сначала, что цепь эмиттер — база разомкнута и ток в ней равен нулю ($I_э = 0$), а между коллектором и

базой приложено обратное напряжение E_2 (порядка десятка вольт). В этом случае в цепи коллектора проходит небольшой обратный ток $I_{к0}$. Этот ток является одним из параметров транзистора, и меньшие значения его соответствуют лучшим качествам полупроводников.

Теперь включим между эмиттером и базой источник постоянного напряжения E_1 (порядка единиц вольт).

В эмиттере значительно больше атомов примеси, чем в базе, и концентрация дырок в эмиттере во много раз больше концентрации электронов в базе. Напряжение E_1 в цепи эмиттер — база действует в прямом направлении,

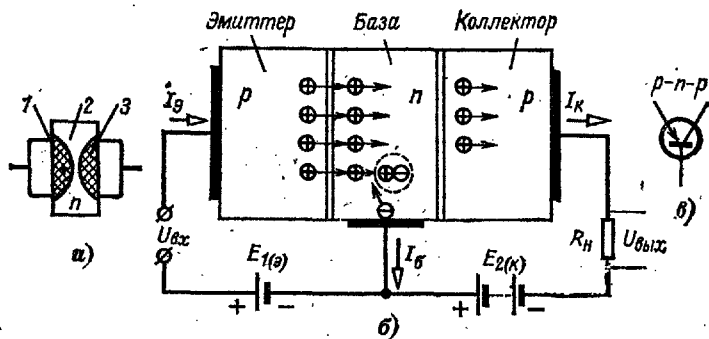


Рис. 17-22. Схема транзистора типа $p-n-p$.

а так как прямое сопротивление $p-n$ -перехода мало, то даже при небольшом напряжении E_1 ток эмиттер — база, обусловленный движением преимущественно основных носителей — дырок, сравнительно велик. В базе незначительная часть дырок рекомбинирует со свободными электронами, убыль которых пополняется новыми электронами, поступающими из внешней цепи, образуя ток $I_б$. В базе благодаря диффузии большая часть дырок, продолжая движение, доходит до коллекторного перехода и под действием электрического поля источника E_2 проходит через $p-n$ -переход в коллектор. Таким образом, в цепи база — коллектор возникает ток $I_к = I_э - I_б$ того же порядка, что и на участке эмиттер — база. Отношение приращения коллекторного тока $\Delta I_к$ к приращению эмиттерного тока $\Delta I_э$ при постоянном напряжении на коллекторе называется коэффициентом передачи тока (или коэффициентом усиления по току):

$$\alpha = k_i = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_э} \quad \text{при} \quad U_к = \text{const.} \quad (17-3)$$

Из сказанного выше следует, что коэффициент передачи всегда меньше единицы и имеет значение 0,9—0,99.

Устройство плоскостного германиевого транзистора дано на рис. 17-23. Базой триода является пластина 10 из кристаллического германия с электронной проводимостью. Она укреплена на стойке 9, соединенной с выводом 2. С двух сторон в пластину вплавлены индиевые электроды 8 и 11. При плавлении индия между каждым из этих электродов

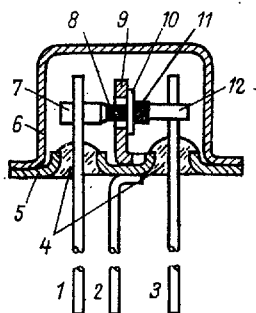


Рис. 17-23. Плоскостной германиевый транзистор.

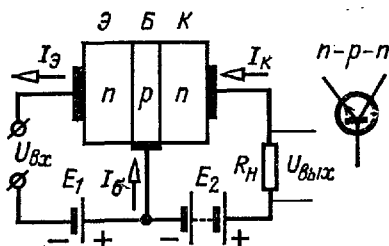


Рис. 17-24. Схема транзистора типа $n-p-n$.

и германиевой пластиной $\frac{1}{2}$ базой создаются области с дырочной проводимостью. Триод заключается в металлический корпус 5, 6. Выводы от эмиттера 7, 1 и коллектора 12, 3 изолированы от корпуса стеклянными проходными изоляторами 4.

Наряду с транзисторами типа $p-n-p$ применяются транзисторы типа $n-p-n$ (рис. 17-24), которые работают аналогично рассмотренному. В транзисторе типа $n-p-n$ под действием напряжения между эмиттером и базой эмиттируются электроны из области n в область p . Полярность источников э. д. с. E_1 и E_2 должна быть обратной по сравнению с полярностью тех же источников в схемах с триодами типа $p-n-p$.

В рассмотренных схемах (рис. 17-22 и 17-24) база является общим участком цепи эмиттера и коллектора, поэтому они называются *схемами с общей базой*.

17-10. Применение транзисторов для усиления колебаний

При работе транзистора в качестве усилителя электрических колебаний входное переменное напряжение $U_{вх}$ — сигнал, подлежащий усилению, можно включить последовательно с источником постоянного напряже-

ния E_1 (рис. 17-25) между эмиттером и базой, а нагрузочное сопротивление R_H , напряжение на котором представляет собой усиленный сигнал, включить между коллектором и базой.

При отсутствии входного сигнала в цепи эмиттера проходит постоянный ток $I_э$ и ток в цепи коллектора $I_к = I_э - I_б \approx I_э$ создает на сопротивлении нагрузки R_H постоянное напряжение, которое является выходным:

$$U_{\text{вых}} = U_H = I_к R_H. \quad (17-4)$$

При появлении на входных зажимах переменного напряжения $U_{\text{вх}}$ результирующее напряжение в цепи база — эмиттер будет состоять из двух составляющих E_1 и $U_{\text{вх}}$. В соответствии с напряжением ток в цепи эмиттера $I_э$ и ток в цепи коллектора $I_к$ также будут состоять из двух составляющих. Переменная составляющая тока коллектора создает на сопротивлении нагрузки R_H переменную составляющую выходного напряжения $U_{\text{вых}}$, которая будет усиленным напряжением входного сигнала $U_{\text{вх}}$.

Отношение выходного напряжения $U_{\text{вых}} = I_к R_H$ к входному напряжению $U_{\text{вх}} = I_э R_э$ называется коэффициентом усиления транзистора по напряжению:

$$k_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{I_к R_H}{I_э R_э} \approx \frac{R_H}{R_э}. \quad (17-5)$$

Так как коллекторный ток $I_к$ почти равен эмиттерному току $I_э$, то коэффициент усиления по напряжению приближенно равен отношению сопротивлений $R_H/R_э$. Следовательно, для получения достаточно большого усиления необходимо сопротивление нагрузки брать большим по сравнению с сопротивлением цепи эмиттера $R_э$.

Коэффициент усиления по мощности

$$k_p = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \frac{I_к^2 R_H}{I_э^2 R_э} = k_i k_u \approx k_u. \quad (17-6)$$

Из рассмотренного выше ясно, что устройство транзистора и трехэлектродной электронной лампы различны, различны и происходящие в них физические процессы, но

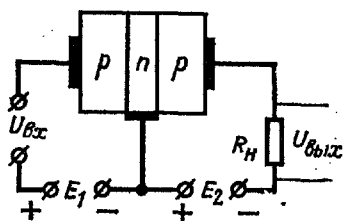


Рис. 17-25. Применение транзистора p - n - p для усиления колебаний.

при использовании их в качестве усилителей можно провести некоторые аналогии.

В электронной лампе при работе ее в качестве усилителя приращение сеточного напряжения вызывает изменение электронного потока, усиление анодного тока и увеличение напряжения (мощности) в нагрузке.

В транзисторном усилителе приращение напряжения между эмиттером и базой вызывает изменение количества эмиттированных основных носителей заряда (дырок или электронов), усиление тока в цепи коллектора и увеличение напряжения (мощности) в нагрузке.

Таким образом, общим для того и другого усилителей является при малой мощности сигнала на входных зажимах получение на выходе подобного сигнала большой мощности.

Из преимуществ транзисторов перед электронными приборами отметим: отсутствие цепи накала и, следовательно, упрощение электрической схемы, увеличение механической прочности и долговечности, постоянная готовность к работе, малые размеры и масса, низкое напряжение питания, малая мощность и высокий к. п. д.

Из недостатков транзисторов отметим: зависимость режима работы от температуры окружающей среды, значительное различие между входными и выходными сопротивлениями, небольшая выходная мощность, чувствительность к перегрузкам, разброс параметров, т. е. отдельные однотипные триоды значительно отличаются друг от друга по своим параметрам и др.

17-11. Схемы включения и характеристики транзисторов

Возможны три основные схемы включения транзистора: с общей базой (рис. 17-26, а), с общим эмиттером (рис. 17-26, б) и с общим коллектором (рис. 17-26, в). Схемы включения транзисторов отличаются своими свойствами, но принцип усиления электрических колебаний, рассмотренный выше, остается неизменным.

Схема транзистора с общей базой по существу рассмотрена выше (§ 17-10). В этой схеме через источник сигнала проходит весь ток эмиттера и поэтому усиления по току не происходит. Коэффициент усиления по току, как мы видели, в лучшем случае имеет значения $\alpha = 0,9 \div 0,995$.

Включая триод по схеме с общим эмиттером, получим усиление не только по напряжению, но и по току, вследствие того что через источник сигнала проходит ток базы, который значительно меньше тока коллектора. Коэффициент усиления по току β в этой схеме определяется как отноше-

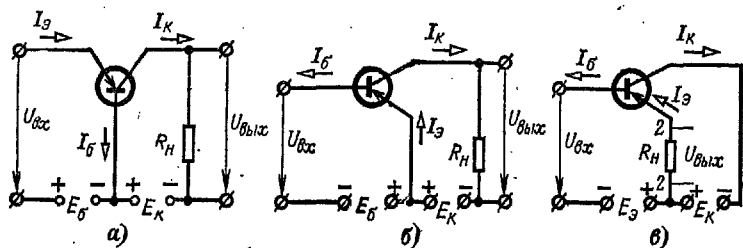


Рис. 17-26. Схемы включения транзисторов.

а — с общей базой; б — с общим эмиттером; в — с общим коллектором.

ние приращения тока коллектора к приращению тока базы при постоянном напряжении на коллекторе:

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_б} \quad \text{при} \quad U_K = \text{const.} \quad (17-7)$$

Учитывая равенство $I_э = I_K + I_б$, найдем:

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_э - \Delta I_K} = \frac{\Delta I_K / \Delta I_э}{(\Delta I_э / \Delta I_э) - (\Delta I_K / \Delta I_э)} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (17-8)$$

Для триодов коэффициент усиления β имеет значение 10—200.

Зависимости между током и напряжением во входной и выходной цепях триода определяются его вольт-амперными характеристиками.

На рис. 17-27, а показаны входные характеристики триода типа $p-n-p$, включенного по схеме с общей базой:

$$I_э = f(U_{эб}) \quad \text{при} \quad U_{кб} = \text{const.}$$

При малых значениях напряжения между эмиттером и базой ($U_{эб}$) эмиттерный ток $I_э$ растет медленно (сопротивление $p-n$ -перехода велико), а затем крутизна характеристики увеличивается.

Одна характеристика (рис. 17-27, а) снята при напряжении между коллектором и базой, равном нулю ($U_{кб} = 0$), а другая — при напряжении $U_{кб} = -15$ В. При увеличении отрицательного напряжения $U_{кб}$ входная характери-

стика смещается влево, так как происходит незначительное увеличение эмиттерного тока вследствие влияния поля, созданного напряжением $U_{кб}$ на эмиттерный переход.

На рис. 17-27 показаны выходные характеристики

$$I_k = f(U_{кб}) \text{ при } I_э = \text{const.}$$

Выходные характеристики показывают, что напряжение $U_{кб}$ весьма слабо влияет на коллекторный ток I_k , так как в основном он зависит от количества дырок, инжектируемых (впрыскиваемых) эмиттером в базу, т. е. от эмиттерного тока $I_э$.

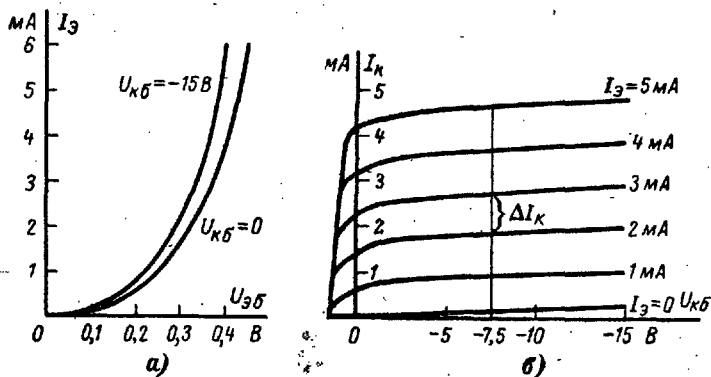


Рис. 17-27. Вольт-амперные характеристики триода $p-n-p$, включенного по схеме с общей базой.

а — входные характеристики $I_э = f(U_эб)$ при $U_{кб} = \text{const}$; б — выходные характеристики $I_k = f(U_{кб})$ при $I_э = \text{const}$.

Выходные характеристики дают возможность определить коэффициент передачи тока (17-3) $\alpha \approx \Delta I_k / \Delta I_э$, где ΔI_k — разность ординат, принадлежащих двум характеристикам (например 2 и 3 мА рис. 17-27, б), соответствующим одной и той же оси абсцисс (например, -7.5 В); а $\Delta I_э$ — разность эмиттерных токов, при которых снимались характеристики (например, $\Delta I_э = 3 - 2 = 1 \text{ мА}$).

На рис. 17-28 показаны входные и выходные характеристики триода типа $p-n-p$, включенного по схеме с общим эмиттером.

Входные характеристики (рис. 17-28, а) представляют собой зависимость тока базы $I_б$ от напряжения между базой и эмиттером $U_{бэ}$ при напряжении $U_{кэ} = \text{const}$, т. е.

$$I_б = f(U_{бэ}) \text{ при } U_{кэ} = \text{const.}$$

При малых значениях напряжения $U_{бэ}$, ток базы $I_б$ растет медленно, по мере увеличения напряжения $U_{бэ}$, крутизна характеристики увеличивается и становится постоянной. Наклон линейных частей характеристик несколько различен при различных выходных напряжениях $U_{кэ}$.

Выходные характеристики (рис. 17-28, б)

$$I_k = f(U_{кэ}) \text{ при } I_б = \text{const.}$$

Выходные характеристики транзистора типа $p-n-p$, включенного по схеме с общим эмиттером, в рабочей части

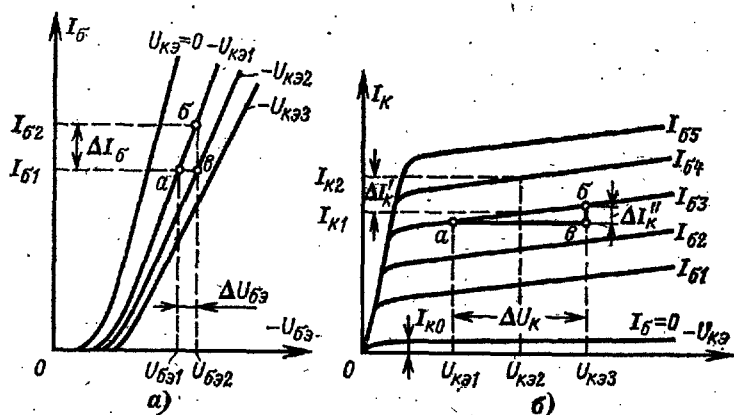


Рис. 17-28. Статические характеристики триода $p-n-p$, включенного по схеме с общим эмиттером.

а — входные характеристики; б — выходные характеристики.

имеют наклон больший, чем у одноименных характеристик для схемы с общей базой. Это результат влияния коллекторного напряжения на процесс инжекции дырок в базу.

При рассмотрении работы триода типа $p-n-p$, включенного по схеме с общим коллектором, обычно пользуются теми же характеристиками, что и для схемы с общим эмиттером.

Параметры транзисторов, применяемые для оценки их свойств, делятся на первичные и вторичные.

К первичным параметрам относятся:

1. Сопротивление эмиттерного перехода $r_э$, имеющее значение десятков ом.
2. Сопротивление базы $r_б$, имеющее значение сотен ом.
3. Сопротивление коллекторного перехода $r_к$, исчисляемое сотнями или тысячами ом.

4. Коэффициент усиления по току, обозначаемый α или β в зависимости от схемы соединения транзистора.

Вторичные параметры устанавливают связь между малыми приращениями токов и напряжений в транзисторе. Они определяются схемой включения транзистора. Наибольшим применением пользуется система h -параметров.

Параметры можно определить по статическим характеристикам.

Для схемы с общим эмиттером (рис. 17-26, б) h -параметры определим по характеристикам (рис. 17-28):

1. Входное сопротивление транзистора

$$h_{1.1} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_б} = \frac{U_{бэ2} - U_{бэ1}}{I_{б2} - I_{б1}} \quad \text{при} \quad U_{кэ1} = \text{const.} \quad (17-9)$$

2. Величина, обратная коэффициенту усиления по напряжению,

$$h_{1.2} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta U_к} = \frac{U_{бэ2} - U_{бэ1}}{U_{кэ2} - U_{кэ1}} \quad \text{при} \quad I_{б1} = \text{const.} \quad (17-10)$$

3. Коэффициент усиления по току

$$h_{2.1} = \frac{\Delta I'_к}{\Delta I_б} = \frac{I_{к2} - I_{к1}}{I_{б2} - I_{б1}} \quad \text{при} \quad U_{кэ2} = \text{const.} \quad (17-11)$$

4. Выходная проводимость

$$h_{2.2} = \frac{\Delta I''_к}{\Delta U_к} = \frac{\Delta I'_к}{U_{кэ2} - U_{кэ1}} \quad \text{при} \quad I_{б3} = \text{const.} \quad (17-12)$$

Для усиления напряжения часто применяют схему с общим эмиттером (рис. 17-29, а).

Рассмотрим процесс усиления напряжения, воспользовавшись входными (17-29, б) и выходными (17-29, в) характеристиками.

Нанесем на выходные характеристики линию нагрузки, проведя ее через точку Б, соответствующую э. д. с. источника $E_{кб} = 12$ В и точку В, определяемую током $I_{к.макс} = E_к/R_к$. Допустим при отсутствии входного сигнала ток базы выбран $I_б = 0,1$ мА, тем самым определено положение рабочей точки А на линии нагрузки. Входное напряжение, амплитуда которого $U_{вх.макс} = 0,05$ В вызывает (рис. 17-29, б) изменение тока базы $I_б$ от $0,1 - 0,05 = 0,05$ мА до $0,1 + 0,05 = 0,15$ мА. График изменения тока базы, обусловленного входным напряжением, показан на рис. 17-29, в. На том же рисунке дан график изменения выходного напряжения, амплитуда которого $U_{вых.макс} =$

$= 2,5$ В, в то время как входное напряжение имеет амплитуду $U_{\text{вх. макс}} = 0,05$ В. Таким образом, коэффициент усиления по напряжению

$$k_U = \frac{U_{\text{вых. макс}}}{U_{\text{вх. макс}}} = \frac{2,5}{0,05} = 50.$$

Разделительные конденсаторы C_{p1} и C_{p2} служат для выделения переменных составляющих напряжения.

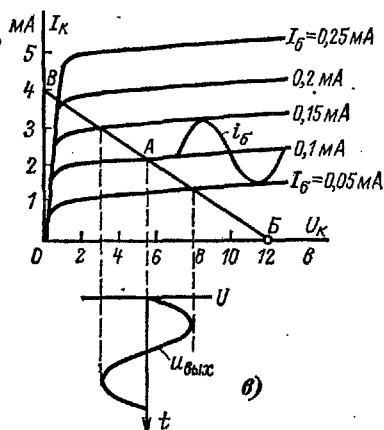
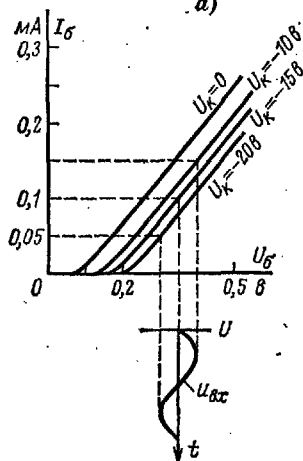
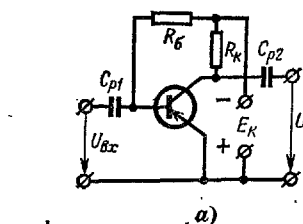


Рис. 17-29. Схема усилителя напряжения с общим эмиттером (а) и характеристики усилителя (б и в).

Так как обычно одного усилительного каскада бывает недостаточно, то прибегают к многокаскадным усилителям. На рис. 17-30 в качестве примера дана схема двухкаскадного усилителя, включенного по схеме с общим эмиттером.

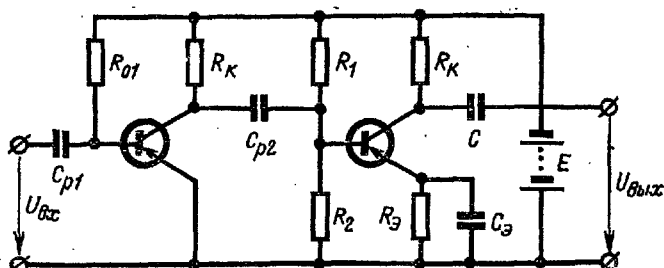


Рис. 17-30. Схема двухкаскадного усилителя напряжений на транзисторах, включенных по схеме с общим эмиттером.

17-12. Обозначения полупроводниковых триодов

Обозначение полупроводникового триода, также как и диода содержит пять элементов:

1-й элемент обозначения — буква, указывающая исходный материал прибора: Г — германий, К — кремний, А — арсенид галлия;

2-й элемент обозначения — буква, указывающая тип прибора; Т — транзистор;

3-й элемент обозначения — цифра, указывающая класс или назначение прибора: 1 — транзистор малой мощности до 0,3 Вт низкой частоты (не более 3 МГц); 2 — транзистор малой мощности средней частоты (от 3 до 30 МГц); 3 — транзистор малой мощности высокой частоты (более 30 МГц); 4 — транзистор средней мощности (от 0,3 до 1,5 Вт), низкой частоты; 5 — транзистор средней мощности средней частоты; 6 — транзистор средней мощности высокой частоты; 7 — транзистор большой мощности (более 1,5 Вт) низкой частоты; 8 — транзистор большой мощности средней частоты; 9 — транзистор большой мощности высокой частоты.

4-й элемент обозначения — число, указывающее порядковый номер разработки прибора (от 01 до 99);

5-й элемент обозначения — буква, указывающая деление технологического типа на группы (от А до Я).

Например: КТ540А — кремниевый транзистор средней мощности, средней частоты, номер разработки 40, группа А.

17-13. Лабораторная работа. Снятие характеристик транзистора

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с содержанием § 17-9—17-11.

П л а н р а б о т ы

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их основные технические данные.

2. Собрать схему (рис. 17-31) и показать ее руководителю.

3. При разомкнутой входной цепи установить напряжение на коллекторе $U_{кэ} = -8$ В и измерить начальный обратный ток коллектора $I_{ко}$.

Повторить измерения при других значениях напряжений $U_{кэ}$ и убедиться, что ток $I_{ко}$ остается неизменным.

4. Установить значение $U_{кэ} = 0$ и, изменяя напряжение между базой и эмиттером $U_{бэ}$ от нуля до 250 мВ ступенями по 50 мВ, измерить ток базы I_b .

Повторить наблюдения сначала при напряжении $U_{кэ} = -5$ В, а затем при напряжении $U_{кэ} = -10$ В. Наблюдения записать в табл. 17-1.

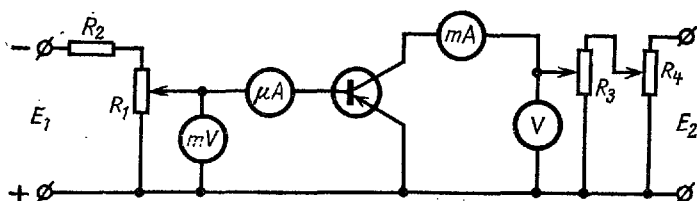


Рис. 17-31. Схема соединения для снятия характеристик транзистора.

По полученным данным построить три входные статические характеристики $I_6 = f(U_{6э})$ при $U_{кэ} = \text{const}$ для транзистора, соединенного по схеме с общим эмиттером.

Таблица 17-1

№ наблюдений	$U_{кэ}=0$		$U_{кэ}=-5$ В		$U_{кэ}=-10$ В	
	$U_{6э}$, мВ	I_6 , мкА	$U_{6э}$, мВ	I_6 , мкА	$U_{6э}$, мВ	I_6 , мкА
1	0		0		0	
2	50		50		50	
3	100		100		100	
4	150		150		150	
5	200		200		200	
6	250		250		250	

5. Установить ток базы $I_6 = 50$ мкА и, изменяя напряжение на коллекторе $U_{кэ}$ от нуля до -12 В ступенями по 1 В, измерить ток коллектора.

Таблица 17-2

№ наблюдений	$I_6=50$ мкА		$I_6=100$ мкА		$I_6=150$ мкА		№ наблюдений	$I_6=50$ мкА		$I_6=100$ мкА		$I_6=150$ мкА	
	$U_{кэ}$, В	$I_{к'}$, мА	$U_{кэ}$, В	$I_{к'}$, мА	$U_{кэ}$, В	$I_{к'}$, мА		$U_{кэ}$, В	$I_{к'}$, мА	$U_{кэ}$, В	$I_{к'}$, мА	$U_{кэ}$, В	$I_{к'}$, мА
1	0		0		0		8	-7		-7		-7	
2	-1		-1		-1		9	-8		-8		-8	
3	-2		-2		-2		10	-9		-9		-9	
4	-3		-3		-3		11	-10		-10		-10	
5	-4		-4		-4		12	-11		-11		-11	
6	-5		-5		-5		13	-12		-12		-12	
7	-6		-6		-6								

Повторить наблюдения сначала при токе базы $I_6 = 100$ мкА, а затем при токе $I_6 = 150$ мкА.

Наблюдения записать в табл. 17-2.

По полученным данным построить три выходные статические характеристики

$$I_k = f(U_{kз}) \quad \text{при} \quad I_6 = \text{const.}$$

Глава восемнадцатая

Фотоэлектронные приборы и электронные реле

18-1. Фотоэлементы с внешним фотоэффектом

Фотоэлементом называется электровакуумный, полупроводниковый или иной электроприбор, электрические свойства которого (сила тока, внутреннее сопротивление, или э. д. с.) изменяются под действием падающего на него светового излучения.

В зависимости от среды, в которой происходит движение электронов, фотоэлементы делятся на три класса.

Вакуумные или электронные фотоэлементы, в которых движение электронов происходит в вакууме.

Газонаполненные или ионные фотоэлементы, в которых при движении электронов в разреженном газе происходит ионизация атомов газа.

Полупроводниковые — в которых освобожденные электроны увеличивают проводимость элементов или создают э. д. с.

В электронных и ионных фотоэлементах используется внешний фотоэффект.

Внешний фотоэффект, называемый иначе фотоэлектронной эмиссией, как указывалось (§ 13-4), заключается в том, что источник излучения сообщает части электронов вещества дополнительную энергию, достаточную для выхода их из данного вещества в окружающую среду (вакуум или разреженный газ).

В фоторезисторах (фотосопротивлениях) используется внутренний фотоэффект.

Внутренний фотоэффект заключается в том, что источник излучения вызывает увеличение энергии у части электронов вещества ионизацию части атомов и образование новых носителей зарядов — свободных электронов

и дырок, вследствие чего электрическое сопротивление вещества уменьшается.

В полупроводниковых фотоэлементах — фотодиодах и фототриодах используется фотоэффект возникновения э. д. с. в $p-n$ -переходе вследствие разделения полем перехода электронно-дырочных пар, возникающих под действием падающего на переход светового потока.

Фотодиоды могут работать или в режиме с источником внешнего напряжения или в режиме без источника питания, сами являясь источниками э. д. с.

Наиболее распространенными электронными фотоэлементами являются *кислородно-цезиевые* и *сурьмяно-цезиевые*.

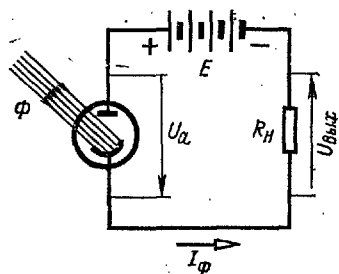
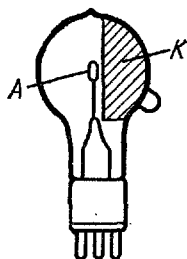


Рис. 18-1. Электронный фотоэлемент и его условное обозначение.

Рис. 18-2. Схема включения фотоэлемента.

Электронный кислородно-цезиевый фотоэлемент (рис. 18-1) состоит из стеклянной колбы, в которой создан вакуум. Внутренняя поверхность колбы, за исключением небольшого «окна» для прохождения света в колбу, покрывается слоем серебра (подложка), на который наносится полупроводниковый слой *оксида цезия* — катод фотоэлемента K . У сурьмяно-цезиевых вакуумных фотоэлементов подложка выполняется из сурьмы, на которую наносится полупроводниковый слой.

Анод A в фотоэлементах изготавливается в виде кольца, так как он не должен преграждать путь световому потоку к катоду.

Ионные фотоэлементы изготавливаются только кислородно-цезиевыми. Они отличаются от электронных только тем, что колба после откачки воздуха заполняется аргоном при низком давлении.

Соединив фотоэлемент с сопротивлением нагрузки R_H и источником питания (рис. 18-2), получим на фотоэлементе

аподное напряжение U_a , а между анодом и катодом электрическое поле. Если через окно фотоэлемента на его катод будет падать световой поток, то эмиттированные электроны под действием сил поля будут перемещаться от катода к аноду. Таким образом, в цепи установится *фототок*, который будет проходить в течение всего времени освещения катода. Зависимость фототока I_ϕ от светового потока Φ при неизменном напряжении источника э. д. с., т. е.

$$I_\phi = f(\Phi) \quad \text{при} \quad U = \text{const},$$

называется *световой характеристикой*.

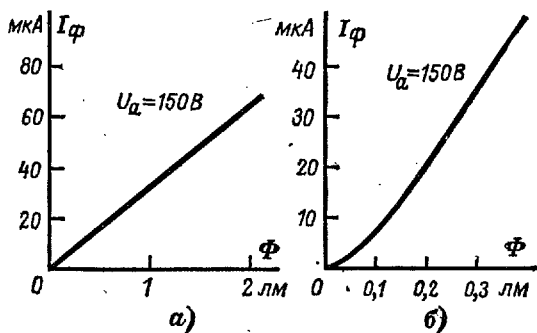


Рис. 18-3. Световые характеристики.

а — электронного фотоэлемента; б — ионного фотоэлемента.

Для электронного фотоэлемента она линейна (рис. 18-3, а):

$$I_\phi = S\Phi.$$

Для ионного фотоэлемента она нелинейна (рис. 18-3, б).

В ионном фотоэлементе ионизация электронами атомов газа увеличивает поток электронов, т. е. увеличивает ток фотоэлемента. Отношение тока I_a , усиленного за счет ионизации газа к первичному электронному фототоку I_ϕ , называется коэффициентом газового усиления

$$K_r = I_a / I_\phi.$$

Чем больше газа введено в фотоэлемент, тем больше коэффициент K_r . Обычно он равен 4—6.

Одним из важных параметров фотоэлемента является его интегральная чувствительность,

представляющая собой отношение фототока, выраженного в микроамперах к световому потоку белого света, выраженного в люменах (лм), получаемому от стандартного источника света.

Интегральная чувствительность

$$S = I_{\Phi} / \Phi.$$

Для электронных фотоэлементов она составляет 20—120 мкА/лм, а для ионных 150—250 мкА/лм.

Фотоэлектронная эмиссия, а следовательно, и фототок фотоэлемента зависит от длины волны λ светового излучения

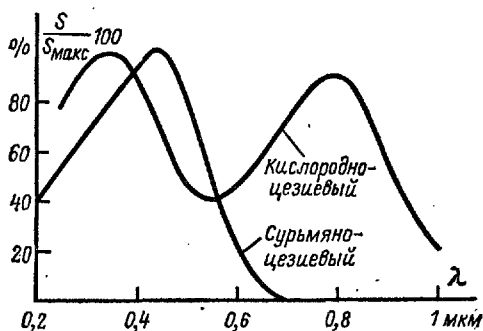


Рис. 18-4. Спектральные характеристики электронных фотоэлементов.

(§ 13-4), поэтому, кроме интегральной чувствительности, пользуются понятием спектральной чувствительности. Спектральной чувствительностью называют отношение фототока к световому потоку заданной длины волны т. е.

$$S_{\lambda} = \frac{I_{\Phi\lambda}}{\Phi_{\lambda}}, \quad \frac{\text{мкА}}{\text{лм}}.$$

Зависимость чувствительности фотоэлемента от длины волны падающего на фотоэлемент светового потока постоянной величины называется спектральной характеристикой элемента, т. е.

$$S_{\lambda} = f(\lambda) \quad \text{при} \quad \Phi_{\lambda} = \text{const} \quad \text{и} \quad U_a = \text{const}.$$

Из рис. 18-4 видно, что у сурьмяно-цезиевого фотоэлемента селективный максимум находится в области голубых и зеленых лучей ($\lambda = 0,4 \div 0,5$ мкм). У кислородно-цези-

евого элемента имеется два селективных максимума при $\lambda = 0,35$ мкм и при $\lambda = 0,8$ мкм.

Вольт-амперные характеристики (рис. 18-5) электронного фотоэлемента, выражающие зависимость

$$I_{\phi} = f(U_a) \quad \text{при} \quad \Phi = \text{const}$$

нелинейны. При увеличении напряжения фототок сначала растет быстро, а затем рост его замедляется и, наконец, почти совсем прекращается (режим насыщения).

У вольт-амперных характеристик (рис. 18-6) ионных фотоэлементов при увеличении анодного напряжения после

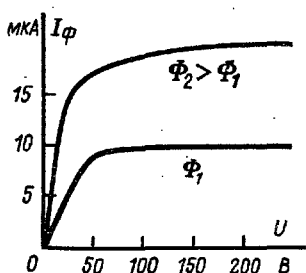


Рис. 18-5. Вольт-амперные характеристики электронного фотоэлемента.

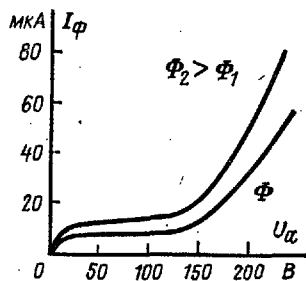


Рис. 18-6. Вольт-амперные характеристики ионного фотоэлемента.

горизонтального участка, кривая поднимается вследствие ионизации.

Одним из свойств фотоэлементов является их *утомляемость*, т. е. изменение параметров в зависимости от времени эксплуатации.

Вследствие малой величины фототока, который можно получить от фотоэлемента (порядка нескольких микроампер), они обычно применяются совместно с ламповыми или полупроводниковыми усилителями.

Фотоэлементы нашли широкое применение в различных областях электроники, автоматики, телевидения, звукового кино, измерительной техники и т. д.

Простейшие схемы применения фотоэлементов рассмотрены в § 18-4.

Фотоэлектронный умножитель это фотоэлемент с внешним фотоэффектом, фототок которого усиливается за счет вторичной электронной эмиссии.

В стеклянном баллоне (рис. 18-7), кроме катода K и анода A , расположен ряд вторичных катодов—эмиттеров K_1, K_2 и т. д., поверхность которых покрыта эмиссионным составом. Каждый следующий друг за другом катод имеет потенциал примерно на 100 В выше предыдущего. Каждый вторичный катод — эмиттер излучает вторичных электронов больше первичных электронов, его бомбардирующих.

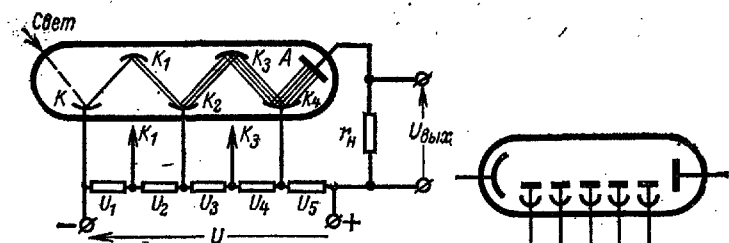


Рис. 18-7. Схема фотоэлектронного умножителя и его обозначение.

Отношение числа вторичных электронов к числу первичных называется коэффициентом вторичной эмиссии σ , имеющим значение 3—4. Таким образом, выходной ток фотоэлектронного умножителя с n вторичными катодами будет σ^n , но максимальный выходной ток фотоэлектронного умножителя не превышает десятков миллиампер.

Чувствительность фотоэлектронного умножителя достигает 100 А/лм. Фотоэлектронные умножители применяются для измерения малых световых потоков примерно до 10^{-8} лм.

Отечественная промышленность выпускает фотоэлектронные умножители с различным числом ступеней (ФЭУ-1 — ФЭУ-19).

18-2. Фоторезисторы

Фоторезистором (фотосопротивлением) называется прибор, электрическое сопротивление которого резко изменяется под действием падающего на него излучения. Поглощение лучистой энергии полупроводником при освещении фоторезистора вызывает ионизацию атомов и увеличение числа свободных носителей заряда электронов и дырок, что вызывает уменьшение его сопротивления.

Фоторезистор представляет собой (рис. 18-8, а, б) стеклянную пластинку 1, на которую (путем испарения в ваку-

уме) нанесен тонкий слой полупроводника 2, а по краям два металлических электрода 3.

Полупроводниковый слой покрывается прозрачным лаком для защиты от влаги. Пластиину помещают в корпус с двумя штырьками, к которым присоединяются электроды. Условное обозначение и схема соединения фоторезистора показаны на рис. 18-8, в и г.

В качестве полупроводников применяют сернистый свинец (резистор ФСА), селенид кадмия (фоторезистор ФСД),

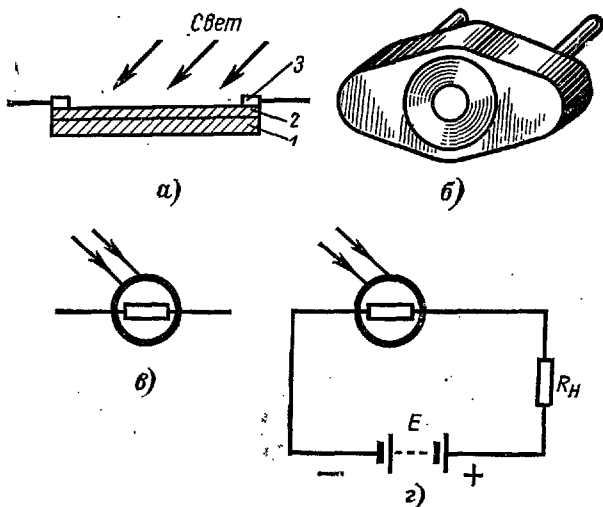


Рис. 18-8. Фоторезистор.

а — устройство; б — внешний вид; в — условный знак; г — схема соединения.

сернистый кадмий (фоторезистор ФСК). Первый целесообразно применять в инфракрасной, а остальные в видимой областях света.

Через неосвещенный фоторезистор проходит малый ток, называемый «темновым», чему соответствует *темновое сопротивление*, которое для различных типов резисторов лежит в границах от сотен килоом до нескольких мегом. При освещении фоторезистора через него идет «световой» ток. Разность между «световым» и «темновым» токами называется *фототоком* $I_{\phi} = I_{\text{св}} - I_{\text{т}}$.

Фоторезистор имеет одинаковое сопротивление в обоих направлениях и может работать только при питании от внешнего источника э. д. с.

Фоторезистор можно характеризовать интегральной чувствительностью $S = I_\Phi / \Phi$, мкА/лм. Но так как ток фоторезистора зависит от напряжения источника питания, то чаще пользуются понятием удельной чувствительности, т. е.

$$S_0 = \frac{S}{U} = \frac{I_\Phi}{\Phi U}, \text{ мкА/лм} \cdot \text{В.}$$

Отечественные фоторезисторы имеют удельную чувствительность $S_0 = 2\,500 - 5\,000$ мкА/лм·В. Учитывая их рабочее напряжение от нескольких десятков до нескольких сотен вольт, получим интегральную чувствительность их на два порядка больше, чем электронных и ионных фотоэлементов.

Зависимость

$$I_\Phi = f(U) \text{ при } \Phi = \text{const},$$

представляющая собой вольт-амперную характеристику фоторезистора (рис. 18-9), обычно линейна.

Фоторезисторы обладают значительной инерцией, нелинейной зависимостью фототока от светового потока (световая характеристика $I_\Phi = f(\Phi)$ при $U = \text{const}$) и сильной зависимостью электрического сопротивления от температуры, что является их недостатком.

Фоторезисторы нашли широкое применение в промышленной электронике, автоматике и вычислительной технике.

Простейшие схемы применения фоторезисторов рассмотрены в § 18-4.

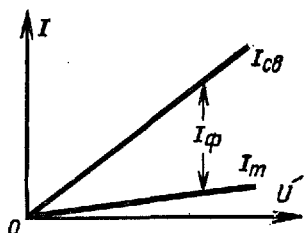


Рис. 18-9. Вольт-амперная характеристика фоторезистора.

18-3. Полупроводниковые фотоэлементы

Полупроводниковым фотоэлементом называется полупроводниковый прибор, в котором под действием падающего на него излучения возникает э. д. с., называемая *фото-э. д. с.* Работа фотоэлемента с запирающим слоем, или, что то же, вентильного фотоэлемента, основана на использовании запирающего слоя между полупроводниками с различными проводимостями (p и n).

Поглощение лучистой энергии при освещении поверхности фотоэлемента вблизи p - n -перехода вызывает ионизацию атомов кристалла и образование новых пар свободных носителей заряда электронов и дырок. Образующиеся электроны под действием электрического поля p - n -перехода ($\mathcal{E}_{\text{пер}}$) уходят в слой n , дырки — в слой p . Это приводит к избытку дырок в слое p и электронов в слое n . Возникающая разность потенциалов (фото-э. д. с.) между слоями p и n вызывает ток I во внешней цепи от электрода p к электроду n . Величина этого тока зависит от количества электронов и дырок, а следовательно, от светового потока.

Схема устройства германиевого фотоэлемента с запирающим слоем показана на рис. 18-10.

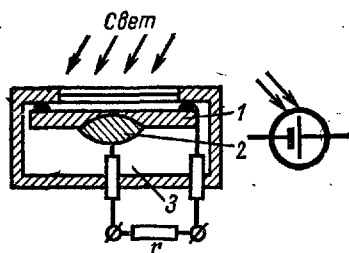


Рис. 18-10. Германиевый фотоэлемент и условный знак полупроводникового фотоэлемента.

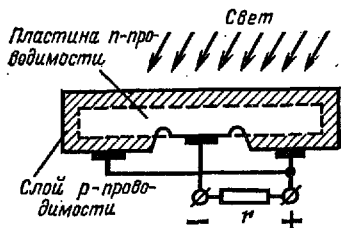


Рис. 18-11. Кремниевый фотоэлемент.

Он состоит из пластинки германия 1 с n -проводимостью, в которую вплавлен индий 2. В процессе изготовления в пластинке германия, расположенной над индием, образуется область с p -проводимостью, на границе которой с германием и создается p - n -переход. Слой германия, расположенный над индием, настолько тонок, что световые лучи свободно проникают в зону p - n -перехода. Корпус фотоэлемента из органического стекла залит изолирующим компаундом 3, через который проходят два проводниковых вывода.

Кремниевый фотоэлемент (рис. 18-11) состоит из пластины кремния с примесью, имеющей n -проводимость. На поверхность пластины путем диффузии в вакууме вводят примесь бора, образуя слой с p -проводимостью толщиной порядка 2 мкм. Батареи кремниевых элементов называются солнечными батареями и применяются для непосредственного преобразования солнечной энергии в электрическую, имея к. п. д. около 11%. Они, в частности,

применяются на искусственных спутниках Земли для питания их радиостанций.

Фотоэлементы с запирающим слоем имеют высокую чувствительность (до 10 мА/лм). Преимущество их перед другими фотоэлементами заключается в том, что они не требуют источника питания. Фотоэлементы нашли широкое применение в различных областях электроники, автоматики, измерительной техники и т. д.

Фотодиодом называется полупроводниковый фотоэлемент с двумя электродами, разделёнными *p-n*-переходом.

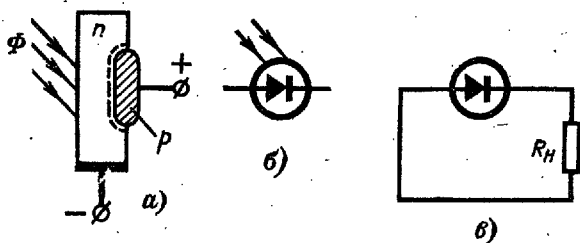


Рис. 18-12. Фотодиод.

а — схема; б — условное обозначение; в — схема соединения при работе его в генераторном режиме.

Фотодиоды могут работать как с внешним источником питания — *фотопреобразовательный режим*, так и без внешнего источника — *генераторный режим*.

На рис. 18-12 показано устройство диода, его условное обозначение и схема включения в генераторном режиме.

При освещении фотодиода создаются дополнительные пары электрон — дырка, часть которых, перемещаясь, достигают *p-n*-перехода. Здесь под действием электрического поля *p-n*-перехода дырки переходят в *p*-область, а электроны остаются в *n*-области, так как они не могут преодолеть потенциального барьера. Происходит накопление дырок в *p*-области и электронов в *n*-области, при этом между электродами устанавливается некоторая разность потенциалов, представляющая собой *фото-э. д. с.*, которая может достигнуть значения 1 В. При наличии сопротивления нагрузки через него будет протекать ток (рис. 18-12, в).

В фотопреобразовательном режиме (рис. 18-13) напряжение источника питания приложено в обратном направлении.

При отсутствии освещения через фотодиод проходит небольшой обратный ток — *темновой ток*.

При освещении электронной области фотодиода возникают пары электрон — дырка. Дырки, доходя до p - n -перехода, под действием его электрического поля переходят в p -область. Следовательно, свет вызывает рост тока неосновных носителей из n -области в p -область, ток в цепи возрастает, т. е. появляется *световой ток*. Изменение тока в цепи, зависящее от освещенности диода, вызывает в нагрузке падение напряжения, пропорциональное величине светового потока, действующего на фотодиод.

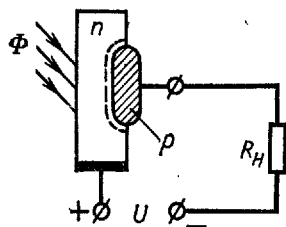


Рис. 18-13. Схема соединения фотодиода при работе его в фотопреобразовательном режиме.

Фотодиод, работающий в режиме фотопреобразователя, подобен фоторезистору, обладающему большей интегральной чувствительностью.

Например, у кремниевых диодов типа ФД-К1 она имеет значение 4—5 мА/лм, а у германиевых типа ФД-2 20—25 мА/лм. Темновой ток первого из указанных фотодиодов составляет 1—3 мкА, а второго 10 мкА.

18-4. Электронные и ионные реле

а) Общие замечания

Р е л е — это автоматический аппарат, в котором при достижении известного значения входной (воздействующей) величины x , например тока I , выходная (управляющая) величина y , например напряжение U , изменяется скачком. Из характеристики реле (рис. 18-14) видно, что при изменении входной величины x от нуля до x_2 выходная величина y остается неизменной и равной y_1 (U_1). В момент достижения воздействующей величиной значения $x = x_2$ ($I_{ср}$), называемого *параметром срабатывания*, реле производит скачкообразное изменение выходной величины от значения y_1 до значения y_2 (U_2). Дальнейшее изменение величины x не изменяет y .

При уменьшении входной величины до значения x_1 выходная величина y_2 не меняется. В момент достижения входной величиной значения x_1 ($I_{вз}$), называемой *параметром возврата*, реле скачкообразно уменьшает выходную величину до начального значения y_1 (U_1), которое сохраняется при уменьшении x до нулевого значения.

Отношение параметров возврата и срабатывания носит название коэффициента возврата реле

$$k_{вз} = x_1/x_2 = I_{вз}/I_{ср}.$$

Он имеет значение 0,3—0,95.

Реле можно разделить на две группы: контактные (§ 11-13) и бесконтактные. Контакты первой группы реле являются наиболее ненадежной частью их. Бесконтактные электронные и ионные реле обладают большей точностью, безынерционностью, надежностью и долговечностью вследствие отсутствия подвижных частей и поэтому находят себе все более широкое и разнообразное применение в технике. Электронными реле иногда называются сочетания электромеханических реле с электронными усилителями. Простейшее реле такого типа состоит из электромагнитного реле, включенного в анодную цепь электронной лампы. Такие схемы часто применяются в автоматике и телемеханике, так как позволяют свести к минимуму мощности управления. В этих реле сохраняются подвижные части и контакты и поэтому быстродействие их определяется временем работы электромеханического реле.

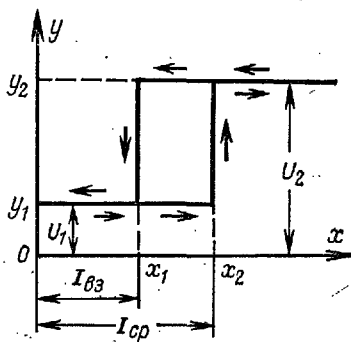


Рис. 18-14. Характеристика реле.

б) Реле напряжения с неоновой лампой

Простейшее реле с неоновой лампой (рис. 18-15, а) состоит из неоновой лампы, ограничительного сопротивления R_6 и электромагнитного реле P . При увеличении вход-

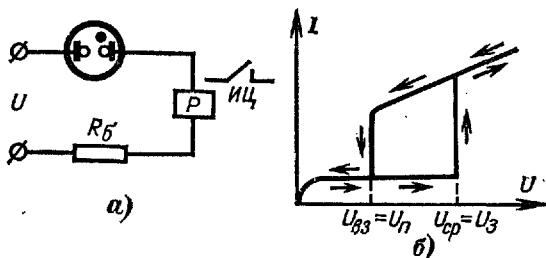


Рис. 18-15. Реле напряжения с неоновой лампой.

ного напряжения до напряжения зажигания лампы U_z в цепи проходит ничтожный ток. При напряжении зажигания $U_z = U_{ср}$ произойдет скачок тока (рис. 18-15, б) и электромагнитное реле замкнет исполнительную цепь ИЦ. При уменьшении напряжения до величины потухания лампы $U_{п}$ ток скачком уменьшится до ничтожной величины вследствие увеличения сопротивления лампы, и электромагнитное реле разомкнет исполнительную цепь. Рассмотренное реле потребляет ничтожную энергию, оно просто и дешево. Главный недостаток — его зависимость срабатывания от температуры.

в) Реле напряжения на электронных лампах

Левая часть схемы (рис. 18-16), состоящая из двух полупроводниковых вентилях B_1 и B_2 и двух конденсаторов C_1 и C_2 , представляет собой выпрямитель переменного тока. Конденсатор C_1 заряжается через вентиль B_1 в течение одного полупериода, конденсатор C_2 — через второй вентиль

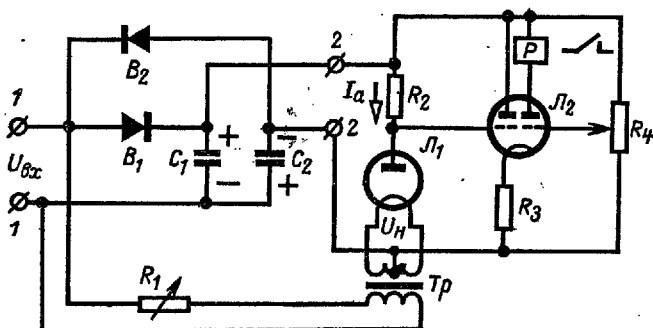


Рис. 18-16. Реле напряжения переменного тока на электронных лампах.

B_2 в течение второго полупериода. По отношению к потребителю, подключенному к выходным зажимам выпрямителя 2, 2, конденсаторы оказываются соединенными последовательно. Если каждый из них заряжается до амплитудного значения входного напряжения U_m (зажимы 1, 1), то напряжение на выходных зажимах 2, 2 в пределе будет равно $2U_m$. Поэтому рассмотренная схема называется *схемой выпрямителя с удвоением напряжения*.

При работе с пониженным напряжением накала анодный ток диода L_1 с вольфрамовым катодом мало зависит

от анодного напряжения U_a . Но он очень резко растет при увеличении напряжения накала.

Двойной триод L_2 является усилителем постоянного тока. Нагрузочным сопротивлением для левого триода служит резистор R_3 . Напряжение на сетке правого триода, от которого зависит величина напряжения отключения реле P , регулируется движком реостата R_4 , а напряжение срабатывания реле — реостатом R_1 .

Увеличение входного напряжения $U_{вх}$ вызывает значительное увеличение тока, идущего через диод L_1 , вследствие роста напряжения накала U_n . В то же время анодный ток I_a не изменяется из-за изменения напряжения U_a (режим насыщения). Поэтому падение напряжения на R_3 увеличится, а напряжение на аноде лампы L_1 уменьшится. Это вызовет увеличение отрицательного смещения на сетке левого триода, которое равно разности падения напряжения на R_3 и анодного напряжения диода L_1 . Анодный ток левого триода и падение напряжения на R_3 уменьшаются. Отрицательное напряжение смещения на сетке правого триода, равное разности падения напряжения на R_3 и напряжения на нижней части реостата R_4 , также уменьшается.

В результате этого уменьшения анодный ток правого триода увеличится до величины, при которой произойдет срабатывание электромагнитного реле P и замыкание его исполнительной цепи.

Уменьшение входного напряжения $U_{вх}$ вызывает уменьшение анодного тока диода L_1 , увеличение его анодного напряжения и уменьшение отрицательного сеточного смещения левого триода. Анодный ток этого триода увеличивается и вызывает рост падения напряжения на R_3 . Отрицательное напряжение смещения на сетке правого триода также увеличивается, а анодный ток уменьшается и происходит размыкание исполнительной цепи реле P .

г) Триггер

Триггер представляет собой бесконтактное электронное реле с двумя устойчивыми состояниями.

Одна из возможных схем триггера на электронных лампах показана на рис. 18-17.

В этой схеме триггера с *положительной обратной связью* анод первой лампы L_1 через делитель напряжения $R_1 - R_{c2}$ соединен с сеткой второй лампы L_2 , а анод второй лампы L_2 через такой же делитель $R_2 - R_{c1}$ связан с сеткой первой лампы.

Допустим, первая лампа заперта, тогда анодный ток ее и падение напряжения на сопротивлении анодной нагрузки R_{a1} равны нулю, следовательно, потенциал анода равен напряжению источника питания E_a .

Напряжение на сетку второй лампы L_2 подводится с зажимов резистора R_{c2} , принадлежащего делителю напряжения $R_1 - R_{c2}$. Сопротивление R_{c2} подобрано так, что лампа L_2 открыта и через нее проходит анодный ток, создающий падение напряжения на R_{a2} , так что потенциал анода лампы L_2 $U_{a2} = E_a - I_a R_{a2}$ низкий.

Напряжение на сетку первой лампы L_1 подводится с зажимов резистора R_{c1} , принадлежащего делителю $R_2 -$

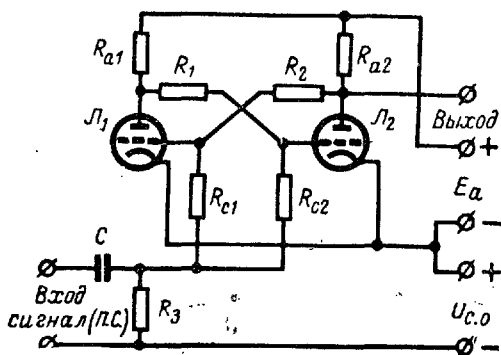


Рис. 18-17. Схема триггера.

R_{c1} , а так как это напряжение недостаточное, то лампа L_1 заперта. Такое состояние будет продолжаться до тех пор, пока положительный импульс, поданный на входные зажимы, скачком не отопрет первую лампу L_1 . При этом потенциал анода этой лампы скачком понизится, что вызовет подобное понижение потенциала сетки второй лампы. Вследствие этого анодный ток лампы L_2 понизится, потенциал ее анода возрастет, что вызовет повышение потенциала сетки лампы L_1 , потенциал этот повышается до тех пор, пока лампа L_2 не окажется запертой скачком, а лампа L_1 останется открытой. Потенциалы сеток ламп без внешнего воздействия остаются неизменными и схема сохраняет состояние, при котором через одну лампу проходит ток, а вторая заперта. Схему можно перевести из одного устойчивого состояния в другое устойчивое состояние, воздействуя на сетку запертой лампы внешним напряжением,

отпиранием запертую лампу, при этом другая лампа запирается.

Напряжение, возникающее на резисторе R_3 при пусковом сигнале, почти полностью передается на сетку запертой лампы, так как сопротивление между сеткой и катодом ее велико, сопротивление между теми же электродами у открытой лампы мало и потенциал ее сетки почти не меняется. Таким образом, пусковой сигнал переводит схему из одного устойчивого состояния в другое, независимо от того, какая лампа в момент поступления сигнала заперта.

Время перевода схемы из одного состояния в другое мало — доли микросекунды.

Положительными свойствами триггеров являются скорость срабатывания и отсутствие контактов. Из недостатков отметим относительно малые значения рабочего тока.

Триггер широко применяется в электронных вычислительных устройствах как один из их основных элементов.

д) Реле времени

Электронные устройства, дающие возможность получить выдержку времени между моментом замыкания или размыкания командной цепи и моментом замыкания исполнительной цепи, называются электронными реле времени. Выдержка времени колеблется от нескольких миллисекунд до нескольких минут.

В электронных реле времени основным измерительным элементом времени служит контур RC (резистор — конденсатор). Одна из возможных схем такого реле дана на рис. 18-18.

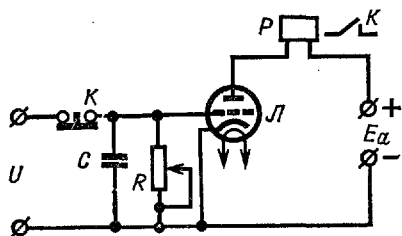


Рис. 18-18. Схема электронного реле времени.

Нормально контакты K замкнуты и на сетку лампы подано отрицательное напряжение, при котором лампа заперта. При размыкании контактов K — начало действия реле, конденсатор C начинает разряжаться на резистор R . Напряжение на зажимах конденсатора u_C а следовательно, и напряжение между сеткой и катодом лампы начинает уменьшаться (16-6):

$$u_C = U_{CH} e^{-t/\tau}.$$

При определенном значении $u_c = U_{c1}$ анодный ток лампы возрастет настолько, что реле P сработает. Это напряжение

$$U_{c1} = U_{cн} e^{-t_1/\tau},$$

откуда определяется время срабатывания реле P :

$$t_1 = RC \ln \frac{U_{cн}}{U_{c1}}.$$

Регулировка времени срабатывания реле производится изменением величины постоянной времени контура $\tau = RC$ путем изменения сопротивления R .

Эти реле используются в устройствах автоматического управления электроприводами.

е) Фотореле

Фотореле нашли широкое применение в промышленной электронике, так как они дают возможность контролировать большое число самых различных величин, например: освещенность; прозрачность сред, нагрев тел;

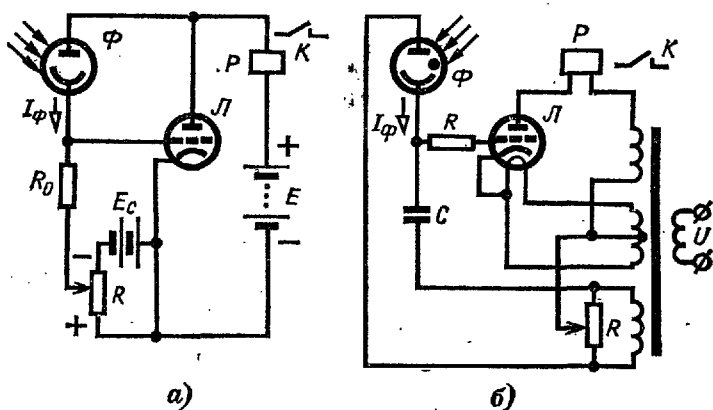


Рис. 18-19. Схемы фотореле.

размеры деталей, качество обработки поверхности, считать количество деталей, прошедших по конвейеру и т. д.

Вследствие малых величин фототоков в большинстве фотореле применяются электронные или другие усилители.

В качестве примеров рассмотрим несколько схем фотореле.

На рис. 18-19, а дана одна из возможных схем фотореле. Фотореле состоит из фотоэлемента Φ , который управляет анодным током усилительной лампы L . Этот ток, проходя по обмотке электромагнитного реле P , вызывает его срабатывание, в результате чего оно включает или отключает цепь управления или измерения.

При отсутствии освещения фототок I_Φ в цепи фотоэлемента практически отсутствует, лампа L заперта, так как сетка ее имеет большой отрицательный потенциал, сообщенный источником сеточного смещения E_c . При освещении фотоэлемента фототок I_Φ создает на резисторе R_0 падение напряжения, которое уменьшает отрицательный потенциал сетки, вследствие чего лампа отпирается, анодный ток ее по мере увеличения освещенности увеличивается и при достижении некоторой предельной освещенности реле P срабатывает, замыкая контакты в цепи управления (измерения).

При отсутствии освещения анодный ток равен нулю, контакты реле разомкнуты.

Реле, схема которого дана на рис. 18-18, б, работает от сети переменного тока.

Здесь в цепи фотоэлемента включен не резистор, а конденсатор C . Изменение освещенности вызывает изменение тока в цепи фотоэлемента, изменение напряжения на конденсаторе C и смещение фазы сеточного напряжения по отношению к анодному напряжению. Вследствие этого изменяется проводящая часть положительного полупериода, а следовательно и среднее значение анодного тока лампы, которым определяется срабатывание реле.

Схемы простейших фотореле с фоторезисторами для постоянного и переменного токов даны на рис. 18-20, а и б. Так как интегральная чувствительность и токи фоторезисторов значительно больше, чем у электронных и ионных фотоэлементов, то во многих случаях схемы фотореле не содержат усилителей, что значительно их упрощает. Так, например, схема 18-20, а, работающая от источника с постоянной э. д. с. E , состоит из последовательно соединенных резистора и электромагнитного реле P . Вторая схема

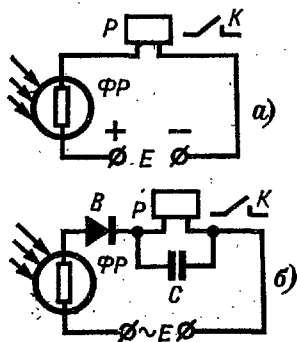


Рис. 18-20. Схема реле с фоторезисторами.

(рис. 18-20, б), работающая от источника переменного тока, отличается от первой только наличием полупроводникового диода *В* и конденсатора *С*, предназначенного поддерживать ток в реле в течение тех полупериодов, когда через диод не проходит ток.

18-5. Лабораторная работа. Электронное реле — триггер

Перед выполнением работы необходимо ознакомиться с содержанием § 18-4, г.

П л а н р а б о т ы

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы, и записать их основные технические данные.
2. Собрать схему (рис. 18-21) и показать ее руководителю.

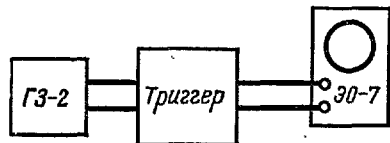


Рис. 18-21. Схема соединения к лабораторной работе «Электронное реле — триггер».

3. Проверить срабатывание реле при одиночных импульсах.
4. Измерить напряжение на аноде одного из триодов триггера при двух различных устойчивых состояниях его.
5. Определить наименьшую амплитуду положительного импульса, который нужно подвести к входным зажимам триггера, при котором он перебрасывается из одного устойчивого состояния в другое, и измерить, таким образом, чувствительность триггера.
6. Подавая на входные зажимы триггера непрерывную серию импульсов, зарисовать кривые анодных напряжений триодов, полученные на экране электронного осциллографа.
7. Произвести запись результатов измерений и наблюдений.
8. Сделать краткие выводы по проделанной работе.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абсолютная диэлектрическая про-
 ницаемость 14
 — магнитная проницаемость 70
 Автоматические воздушные выклю-
 чатели 281
 Автотрансформаторы 240
 Аккумуляторы 54
 Активная мощность 142
 — проводимость 152
 Активное сопротивление 142
 Ампер 26
 Амплитудное значение 131
 Амплитудные искажения 386
 Диодная характеристика 359
 Аудио-сеточная характеристика 359
 Асинхронные электродвигатели 247
 База 464
 Бареттер 417
 Бел 384
 Ватт 38
 Вебер 64
 Векторная диаграмма 138
 Ветвь электрической цепи 50
 Взаимная индуктивность 95
 Взаимодействие параллельных про-
 водов с токами 68
 Вихревые токи 90
 Внутреннее уравнение триода 365
 Воздушные линии 299
 Вольт 10
 Вольт-амперная характеристика 59
 Вольт-секунда 64
 Вращающий момент двигателя 258
 Выходной понижающий трансфор-
 матор 396
 Газовая плазма 405
 Газообразные диэлектрики 21
 Газоразрядные приборы 402
 Газотрон 408
 Гальванические элементы 52
 Генераторы постоянного тока 115
 Герц 70
 Геометрическая нейтраль 104
 Герц 130
 Главный распределительный пункт
 (ГРП) 292
 Г-образный фильтр 354
 Группы соединения трансформато-
 ров 238
 Двухэлектродные электронные лам-
 пы—диоды 332
 Двухэлементный ваттметр 211
 Действующее значение 135
 Джоуль 38
 Диэлектрики 11
 Диэлектрическая проницаемость 15
 Добротность контура 160
 Доливо-Добровольский М. О. 248
 Дуговой разряд 406
 Емкостное сопротивление 155
 Емкостный фильтр 353
 Емкость элемента 54
 Железо техническое 78
 Жидкие диэлектрики 21
 Закон Джоуля—Ленца 39
 — Кирхгофа первый 43
 — — второй 50
 — Ленца 87
 — Ома 30
 — полного тока 72
 — Фарадея 26
 — электромагнитной индукции 84, 86
 Запирающее напряжение 358
 Заполненная зона 12
 Запрещенная зона 12
 Зарядный ток конденсатора 433
 Защитная сетка 380
 Защитное заземление 315
 Зонная теория 12
 Игнитроны 424
 Измерение мощности 208
 Измерительные трансформаторы 243
 Измерительный механизм 196
 — преобразователь 221
 Индуктивное сопротивление 144
 Индуктивность 92
 Индуктивный фильтр 354
 Ионизация газа 402
 Ионные приборы 318
 Катоды электровакуумных прибо-
 ров 327
 Кенотрон 341
 Классы изоляции материалов по
 нагревостойкости 272
 Колебательный контур 99
 Коллектор 99, 464
 Комбинированные лампы 382
 Коммутация 109
 Комплектные распределительные
 устройства (КРУ) 292
 — трансформаторные подстанции
 (КТП) 292
 Контур электрической цепи 50
 Коронный разряд 408
 Короткое замыкание 41

Коэффициент мощности 149

— трансформации 234

— усиления 363, 384

Кривая намагничивания 77

Кулон 14

Ламповый генератор 428

Лампы с переменной крутизной 381

Линейное напряжение 175

Линии магнитной индукции 64

— напряженности электрического поля 8

Листовая электротехническая сталь 79

Магазин сопротивлений 216

Магнитная индукция 63, 98

— постоянная 69

— проницаемость 70

— цепь 81

Магнитное напряжение 72

— насыщенные 75

— поле 7

— сопротивление цепи 74

Магнитомягкие материалы 80

Магнитотвердые материалы 78

Магнитный гистерезис 77

— поток 65

— — возбуждения 98

Магнитодвижущая сила 72, 231

Магнитоэлектрики 80

Максвелл 65

Марки проводов и кабелей 303

Мгновенное значение 131

Мера 190

Метод наложения 48

Механическая характеристика двигателя 121

Многокаскадные ламповые усилители 389

Моменты пусковой, максимальный и номинальный 259

Мост для измерений сопротивления 216

Мощность 37, 231, 272, 310

— потеря 38, 233

Мульти vibrator 436

Нагрев и охлаждение трансформаторов 245

Нагрев и охлаждение электрических машин 272

Напряжение короткого замыкания 237

— смещения 373

Напряженность электрического поля 8

Нейтральный или нулевой провод 174

Нелинейные электрические цепи 59

Неоновая лампа 413

Несамостоятельный разряд 405

Несимметричная система 173

Номинальные величины машин 112

Нормальные условия работы прибора 191

Обмотка возбуждения 98

Обратная связь в усилителях 398

Однородное электрическое поле 9

Ом 31

Омметры 218

Остаточная индукция 77

Относительная продолжительность включения (ПВ) 275

Падение напряжения 42

Пазы якоря 98

Параметры триода 362

Период коммутации 108

Пермаллой 79

Петля гистерезиса 77

Плотность тока 30

Погрешность измерения 190

Полупроводники 11

Полупроводниковый вентиль 456

Поляризация диэлектрика 18

Потенциал ионизации 403

Потери напряжения в проводах 42

Правило буравчика 64

— левой руки 66

— правой руки 84

Прибор измерительный 190

Принцип действия асинхронного двигателя 254

— — и устройство трансформатора 231

— работы машины постоянного тока 100

Пробой диэлектрика 19

Проницаемость триода 364

Пятиэлектродная лампа (пентод) 380

Рабочая точка покоя 371

Рабочие характеристики двигателя 121

Разряд конденсатора 433

Реактивная мощность 145

— проводимости 152

Реактивное сопротивление 160

Регулирование частоты вращения двигателя 122, 262

Режимы работы усилителя 387

Резистор 33

Резонанс напряжений 159

Реле 41, 283, 491

Реостат 33, 227

Ртутные вентили 419

Рубильники 275

Сдвиг фаз 134

Секции обмотки 102

Сила тока 26

Сименс 32

Синхронные машины 266, 268

Скольжение 255

Собственная частота колебательного контура 158

— электропроводность полупроводника 451

Соединение звездой 174

— треугольником 177

Сопротивление заземления 315

Способы пуска асинхронных двигателей 260

Среднее значение тока (напряжения) 137

Стабилитрон 415

Счетчик электрической энергии 213

Темный разряд 406

Температурный коэффициент сопротивления 35

Тепловое реле 284

Термоэлектронная эмиссия 325

Тиратрон 411, 418
Тлеющий разряд 406
Транзисторы 464
Трансформаторы понижающий, повышающий 232
Треугольник мощностей 149
— напряжений 147
— сопротивлений 147
Трехфазная система 172
Трехэлектродная электронная лампа—триод 356
Трехэлементный ваттметр 210
Триггер 489

Угловая частота 133
Ударная ионизация 20, 405
Удельная электрическая проводимость 11, 30
Удельное сопротивление 31
Удельные диэлектрические потери 19
Усилитель мощности 394
Ускоряющее поле 320
Устройство машины постоянного тока 98, 101

Фаза 134
Фарада 14
Ферриты 80
Ферромагнетики 74
Фоторезисторы 481
Фотоэлектронный умножитель 480

Цеховые подстанции 294
Цикл 130
Цифровые лампы 414

Частота 130
— вращения машины 104, 118
— тока в роторе 255
Частотные искажения 386
Четырехэлектродные лампы—тетроды 375
Число пазов статора 251

Шиннопровод 308

Щетки 99

Щеткодержатель 99
Щеточный механизм 99

Эквивалентная емкость 16
Эквивалентное (общее) сопротивление 44
Экран электронолучевой трубки 438
Экранирующая сетка 376
Экситроны 420
Электрическая емкость 13
Электрическая линия 299
— постоянная 14
— проводимость 32
— схема 27
— цепь 27
— энергия 8
Электрические генераторы 97
— машины переменного тока 247
— — постоянного тока 97
— фальтры 352
Электрический диполь 18
— конденсатор 13
— разряд в газе 404
— ток 11, 24
— угол 133

Электрическое напряжение 9
— поле 7
Электродвигатели 97, 119, 123, 125
Электродвижущая сила (э. д. с.) 27
Электроизоляционные материалы 20
Электромагнитная индукция 84
Электромагниты 82
Электронная эмиссия 323
Электронолучевая трубка 438
Электронный усилитель 383
Электроны 7
Электропривод и аппаратура управления 271
Энергия активная 169
— магнитного поля 94
— реактивная 169
— электрического поля 17
Энергосистема 289
Эрстед 71

Яблочков П. Н. 230
Якорь машины постоянного тока 98

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	4

Часть первая

Общая электротехника

Глава первая. Электрическое поле	7
1-1. Основные понятия	7
1-2. Электрическое напряжение. Потенциал	9
1-3. Электропроводность	10
1-4. Электрическая емкость. Конденсаторы	13
1-5. Соединение конденсаторов	16
1-6. Энергия электрического поля	17
1-7. Поляризация диэлектрика	18
1-8. Электроизоляционные материалы	20
Глава вторая. Электрические цепи постоянного тока . .	24
2-1. Электрический ток	24
2-2. Электрическая цепь и ее элементы	27
2-3. Закон Ома	30
2-4. Электрические сопротивление и проводимость	31
2-5. Зависимость сопротивления от температуры	34
2-6. Проводниковые материалы	36
2-7. Работа и мощность	37
2-8. Преобразование электрической энергии в тепловую . . .	39
2-9. Электрическая нагрузка проводов и защита их от перегрузки	40
2-10. Потеря напряжения в проводах	42
2-11. Первый закон Кирхгофа	43
2-12. Последовательное соединение сопротивлений—присм- ников энергии	43
2-13. Параллельное соединение сопротивлений—прием- ников энергии	44
2-14. Смешанное соединение сопротивлений	46
2-15. Два режима работы источника питания	48
2-16. Второй закон Кирхгофа	50
2-17. Расчет сложных цепей	50
2-18. Химические источники питания	52
2-19. Соединение химических источников питания	58
2-20. Нелинейные электрические цепи	59
2-21. Лабораторная работа. Потеря напряжения в линии . .	62
Глава третья. Электромагнетизм	63
3-1. Магнитное поле тока. Магнитная индукция. Магнит- ный поток	63

3-2.	Электромагнитная сила	65
3-3.	Взаимодействие параллельных проводов с токами . . .	68
3-4.	Магнитная проницаемость	70
3-5.	Напряженность магнитного поля. Магнитное напряжение	71
3-6.	Закон полного тока	72
3-7.	Магнитное поле катушки с током	73
3-8.	Ферромагнетики, их намагничивание и перемагничивание	74
3-9.	Ферромагнитные материалы	78
3-10.	Магнитная цепь и ее расчет	81
3-11.	Электромагниты	82
3-12.	Электромагнитная индукция	84
3-13.	Принцип работы электрического генератора	87
3-14.	Принцип работы электродвигателя	88
3-15.	Вихревые токи	90
3-16.	Индуктивность. Электродвижущая сила самоиндукции	92
3-17.	Энергия магнитного поля	94
3-18.	Взаимная индуктивность	95
Глава четвертая. Электрические машины постоянного тока		97
4-1.	Назначение машин постоянного тока	97
4-2.	Устройство машины постоянного тока	98
4-3.	Принцип работы машины постоянного тока	100
4-4.	Устройство обмотки якоря	101
4-5.	Электродвижущая сила обмотки якоря	104
4-6.	Электромагнитный момент на валу машины	105
4-7.	Механическая мощность машины постоянного тока	106
4-8.	Реакция якоря машины постоянного тока	107
4-9.	Коммутация тока	108
4-10.	Понятие о номинальных данных и характеристиках электрических машин	112
4-11.	Генератор с независимым возбуждением	113
4-12.	Генератор с параллельным возбуждением	115
4-13.	Генератор со смешанным возбуждением	116
4-14.	Электродвигатели постоянного тока	117
4-15.	Электродвигатель с параллельным возбуждением	119
4-16.	Электродвигатель с независимым возбуждением	123
4-17.	Электродвигатели с последовательным и со смешанным возбуждением	124
4-18.	Потери и коэффициент полезного действия	126
4-19.	Лабораторная работа. Электродвигатель с параллельным возбуждением	128
4-20.	Лабораторная работа. Генератор с параллельным возбуждением	129
Глава пятая. Основные понятия, относящиеся к переменным токам		130
5-1.	Переменный ток	130
5-2.	Получение синусоидальной э. д. с.	131
5-3.	Сдвиг фаз	133
5-4.	Действующие значения тока и напряжения	135
5-5.	Векторная диаграмма	138

Глава шестая. Цепи переменного тока	140
6-1. Особенности цепей переменного тока	140
6-2. Цепь с сопротивлением	141
6-3. Цепь с индуктивностью	142
6-4. Цепь с активным сопротивлением и индуктивностью	145
6-5. Неразветвленная цепь с активными сопротивлениями и индуктивностями	149
6-6. Разветвленная цепь с активными сопротивлениями и индуктивностями	151
6-7. Цепь с емкостью	153
6-8. Колебательный контур	156
6-9. Резонанс напряжений	159
6-10. Резонанс токов	163
6-11. Коэффициент мощности	167
6-12. Активная и реактивная энергия	169
6-13. Лабораторная работа. Цепь переменного тока с активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью	170
6-14. Лабораторная работа. Параллельное соединение катушки и конденсатора	171
Глава седьмая. Трехфазные цепи	172
7-1. Трехфазные системы	172
7-2. Соединение обмоток генератора звездой	174
7-3. Соединение обмоток генератора треугольником	177
7-4. Соединение приемников энергии звездой	179
7-5. Соединение приемников энергии треугольником	183
7-6. Лабораторная работа. Трехфазные цепи	188
Глава восьмая. Электротехнические измерения и приборы	189
8-1. Основные понятия	189
8-2. Классификация электроизмерительных приборов	191
8-3. Измерительные механизмы приборов	196
8-4. Измерение тока и напряжения	201
8-5. Измерение мощности	208
8-6. Измерение электрической энергии	213
8-7. Измерение сопротивлений	216
8-8. Измерение неэлектрических величин электрическими методами	221
8-9. Лабораторная работа. Измерение сопротивлений	226
8-10. Лабораторная работа. Поверка индукционного счетчика	227
8-11. Лабораторная работа. Измерение мощности в трехфазной цепи	228
Глава девятая. Трансформаторы	230
9-1. Назначение трансформаторов	230
9-2. Принцип действия и устройство однофазного трансформатора	231
9-3. Холостой ход однофазного трансформатора	233
9-4. Работа нагруженного трансформатора и диаграмма магнитодвижущих сил (м. д. с.)	235
9-5. Изменение напряжения трансформатора при нагрузке	236
9-6. Мощность потерь в обмотках нагруженного трансформатора	237
9-7. Трехфазный трансформатор	237

9-8. Регулирование напряжения трансформаторов	239
9-9. Автотрансформаторы	240
9-10. Трансформаторы для дуговой электросварки	241
9-11. Измерительные трансформаторы	243
9-12. Коэффициент полезного действия трансформатора	245
9-13. Нагрев и охлаждение трансформаторов	245
9-14. Лабораторная работа. Однофазный трансформатор	247

Глава десятая. Электрические машины переменного тока 247

10-1. Назначение машин переменного тока. Асинхронные электродвигатели	247
10-2. Получение вращающегося магнитного поля	248
10-3. Обмотка статора асинхронного электродвигателя	250
10-4. Обмотка ротора асинхронного двигателя	253
10-5. Принцип действия асинхронного двигателя	254
10-6. Электродвижущие силы в обмотках статора и ротора	256
10-7. Спротивления обмотки ротора	256
10-8. Токи в обмотке ротора	257
10-9. Вращающий момент двигателя	258
10-10. Пуск в ход асинхронных двигателей	260
10-11. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя	262
10-12. Однофазный асинхронный двигатель	263
10-13. Потери и к. п. д. асинхронного двигателя	265
10-14. Синхронные машины	266
10-15. Универсальный коллекторный двигатель	270
10-16. Лабораторная работа. Трехфазный асинхронный электродвигатель	270

Глава одиннадцатая. Электропривод и аппаратура управления 271

11-1. Система электропривода	271
11-2. Нагрев и охлаждение электрических машин	272
11-3. Выбор мощности двигателя при продолжительном режиме	273
11-4. Выбор мощности двигателя при кратковременном режиме	274
11-5. Выбор мощности двигателя при повторно-кратковременном режиме	274
11-6. Рубильники	275
11-7. Пакетные выключатели	276
11-8. Реостаты для пуска и регулирования электродвигателей	277
11-9. Контроллеры	278
11-10. Плавкие предохранители	280
11-11. Автоматические воздушные выключатели	281
11-12. Контакторы	282
11-13. Реле	283
11-14. Схема управления асинхронным двигателем с помощью реверсивного магнитного пускателя	284
11-15. Схема включения двухскоростного асинхронного двигателя	286
11-16. Автоматический пуск асинхронного двигателя с кольцами	286

11-17.	Автоматический пуск двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением	288
11-18.	Лабораторная работа. Сборка и проверка работы схемы релейно-контакторного управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором	289
Глава двенадцатая. Передача и распределение электрической энергии		289
12-1.	Схемы электроснабжения промышленных предприятий	289
12-2.	Трансформаторные подстанции и распределительные устройства промышленных предприятий	292
12-3.	Электрические сети промышленных предприятий	299
12-4.	Защитное заземление	315
 Часть вторая		
Оснoвы промышленной электроники		
Глава тринадцатая. Двухэлектродные лампы и их применение для выпрямления переменного тока		318
13-1.	Классификация и применение электронных приборов	318
13-2.	Движение электронов в электрическом поле	319
13-3.	Движение электронов в магнитном поле	322
13-4.	Электронная эмиссия	323 ✓
13-5.	Катоды электровакуумных приборов	327
13-6.	Двухэлектродные электронные лампы — диоды	332 ✓
13-7.	Применение двухэлектродных ламп	343
Глава четырнадцатая. Трехэлектродные лампы. Четырех- и пятиэлектродные лампы. Усилители		356
14-1.	Устройство и принцип работы триода	356 ✓
14-2.	Статические характеристики триода	359 ✓
14-3.	Параметры триода	362 ✓
14-4.	Простейший каскад усиления	367
14-5.	Характеристики и параметры простейшего каскада усиления	369 ✓
14-6.	Типы триодов	374 ✓
14-7.	Четырехэлектродные лампы — тетроды	375 ✓
14-8.	Пятиэлектродные лампы — пентоды	380 ✓
14-9.	Комбинированные и многосеточные лампы. Типы ламп	382 ✓
14-10.	Общие понятия, относящиеся к усилителям	383
14-11.	Режимы работы усилителей	387
14-12.	Многокаскадные ламповые усилители	389
14-13.	Обратная связь в усилителях	398 ✓
14-14.	Лабораторная работа. Снятие анодных и анодно-сеточных характеристик триода и определение по ним статических параметров	399
14-15.	Лабораторная работа. Снятие частотных характеристик усилителя напряжения низкой частоты	400
Глава пятнадцатая. Газоразрядные приборы и их применение.		402
15-1.	Виды газового разряда и его вольт-амперная характеристика	402
15-2.	Ионные приборы с несамостоятельным дуговым разрядом	408

15-3.	Приборы с тлеющим разрядом	413
15-4.	Ионные приборы с самостоятельным дуговым разрядом	419
15-5.	Обозначения газоразрядных приборов	425
15-6.	Лабораторная работа. Снятие анодно-сеточных и пусковых характеристик тиратрона	426

Глава шестнадцатая. Электронные генераторы. Осциллографы

		428
16-1.	Генераторы синусоидальных напряжений	428
16-2.	Зарядка и разряд конденсатора	431
16-3.	Релаксационные генераторы (генераторы пилообразного напряжения)	434
16-4.	Мультивибраторы	436
16-5.	Электроннолучевые трубки	438
16-6.	Электроннолучевой осциллограф	442
16-7.	Обозначения электроннолучевых трубок	446
16-8.	Лабораторная работа. Экспериментальное определение кривых напряжений в схемах выпрямителей	447

Глава семнадцатая. Полупроводниковые приборы и их применение

		451
17-1.	Собственная электропроводность полупроводников	451
17-2.	Примесная электропроводность полупроводников	454
17-3.	Полупроводниковый вентиль	456
17-4.	Германиевые и кремниевые диоды	457
17-5.	Меднозакисные и селеновые диоды	460
17-6.	Применение полупроводниковых вентилях и схемы выпрямителей	461
17-7.	Обозначения полупроводниковых диодов	463
17-8.	Кремниевые стабилитроны (опорные диоды)	463
17-9.	Транзисторы	464
17-10.	Применение транзисторов для усиления колебаний	466
17-11.	Схемы включения и характеристики транзисторов	468
17-12.	Обозначения полупроводниковых триодов	474
17-13.	Лабораторная работа. Снятие характеристик транзистора	474

Глава восемнадцатая. Фотоэлектронные приборы и электронные реле

		476
18-1.	Фотоэлементы с внешним фотоэффектом	476
18-2.	Фоторезисторы	481
18-3.	Полупроводниковые фотоэлементы	483
18-4.	Электронные и ионные реле	486
18-5.	Лабораторная работа. Электронное реле — триггер	494
	Алфавитный указатель	495

ВИКТОР СТЕПАНОВИЧ ПОПОВ
СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ НИКОЛАЕВ

**Общая электротехника с основами
электроники**

Редактор И. А. Чекалин

Редактор издательства И. В. Антик

Переплет художника Г. Д. Целищева

Технический редактор Л. В. Иванова

Корректор Е. Х. Горбунова

Сдано в набор 22/II 1972 г. Подписано к печати
18/VIII 1972 г. Т-14803. Формат 84×108¹/₃₂. Бумага типо-
графская № 2. Усл. печ. л. 26,46. Уч.-изд. л. 27,17.
Тираж 200 000 экз. Зак. № 216. Цена 1 р. 01 к.

Издательство «Энергия». Москва, М-114. Шлюзовая
наб., 10.

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская
типография № 1 «Печатный Двор» им. А. М. Горь-
кого Главополиграфпрома Комитета по печати при
Совете Министров СССР, г. Ленинград, Гатчин-
ская ул., 26.