

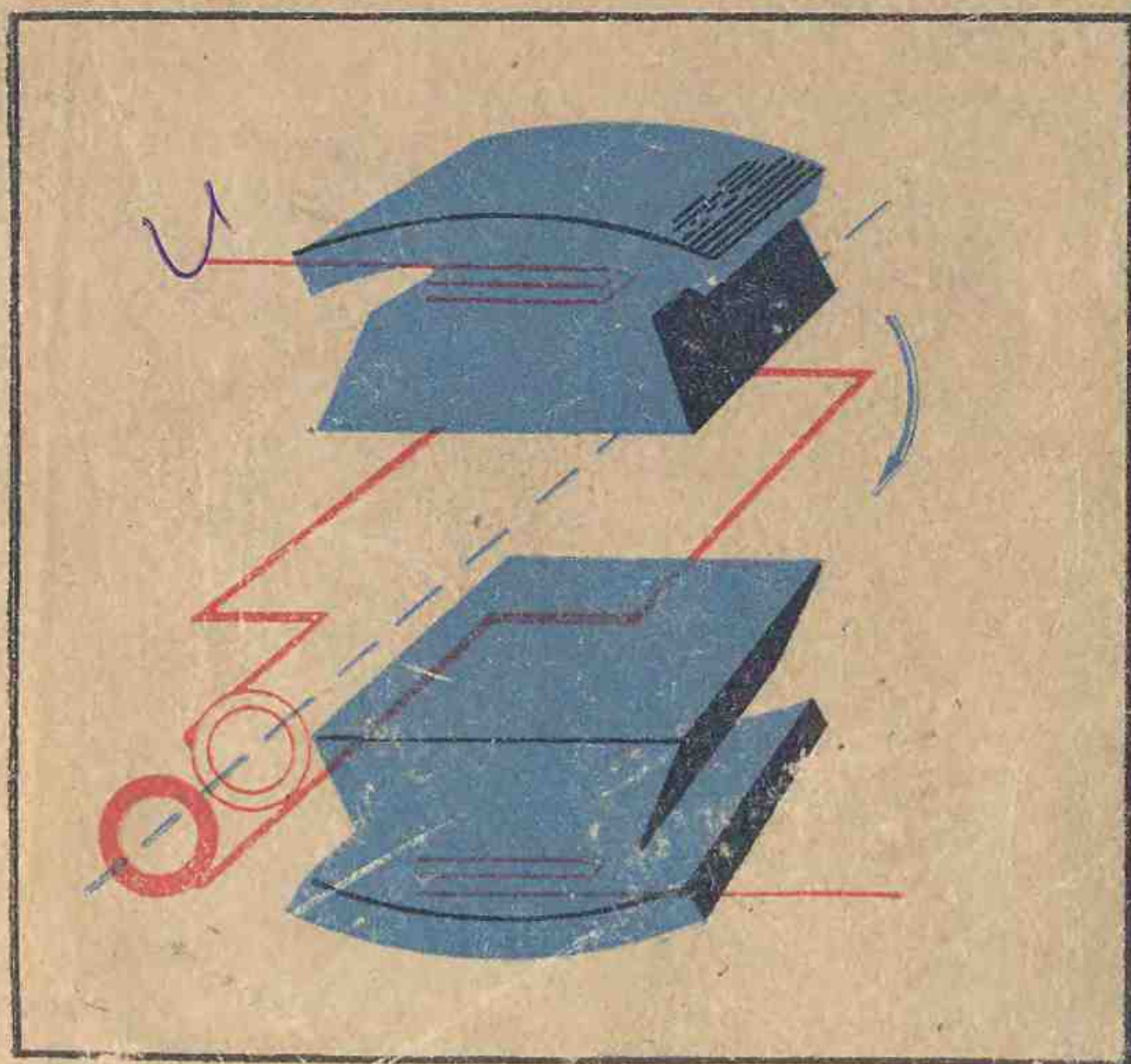
ПРОФТЕХОБРАЗОВАНИЕ



ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

В. Е. КИТАЕВ Л. С. ШЛЯПИНТОХ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА С ОСНОВАМИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ



В. Е. КИТАЕВ, Л. С. ШЛЯПИНТОХ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА С ОСНОВАМИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Издание 3-е,
переработанное и дополненное

Одобрено Ученым советом
Государственного комитета
Совета Министров СССР
по профессионально-техническому
образованию
в качестве учебника
для профессионально-технических
учебных заведений



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ВЫСШАЯ ШКОЛА»
Москва 1973

6П2.1+6П2.151
К45

Китаев В. Е., Шляпнитох Л. С.

К45 Электротехника с основами промышленной электроники. Учебник для проф.-техн. учебных заведений. Изд. 3-е, переработ. и доп. М., «Высшая школа», 1973

360 с. с илл.

В книге содержатся сведения по теории электротехники, рассмотрено устройство и принцип действия электронизмерительных приборов, трансформаторов, электрических машин переменного и постоянного тока. Даны основы электроники, описана конструкция и работа электронных ламп, ионных и полупроводниковых приборов.

Книга является учебником для учащихся профессионально-технических учебных заведений неэнергетического профиля и составлена в соответствии с учебной программой по электротехнике с основами промышленной электроники.

В третьем издании книги переработаны главы, посвященные вопросам постоянного тока, трансформаторов, асинхронных и синхронных машин, а также машин постоянного тока. Книга дополнена новым материалом: заново написана гл. XII «Производство, передача и распределение электрической энергии», а также § 156 «Тиристоры».

Предисловие и гл. II, V, VII—X, XII написаны В. Е. Китаевым, гл. I, III, IV, VI, XI, XIII—XV, а также § 156 гл. XV — Л. С. Шляпнитохом.

6П2.1+6П2.151

Все замечания и предложения просим направлять по адресу: Москва, К-51, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

К 0338—057 34—73
001(01)—73

ПРЕДИСЛОВИЕ

Электротехника — наука о техническом использовании электрических явлений.

Одна из важнейших отраслей электротехники — электроэнергетика изучает использование электричества для получения больших количеств энергии в местах, где имеются ее природные запасы (горючие, ископаемые, реки), передачу энергии на дальние расстояния, распределение ее и преобразование в другие виды энергии (механическую, тепловую, химическую, лучистую).

Решение этих технических задач и явилось основой электрификации — широкого применения электрической энергии в народном хозяйстве и в быту.

Электроника — область электротехники, основанная на использовании явления прохождения электричества через вакуум, газы и другие среды. Электроника рассматривает вопросы технического использования электронных ламп, полупроводниковых и ионных приборов, фотоэлементов, солнечных батарей и других устройств в аппаратуре, выполняющей функции преобразования энергии, управления отдельными механизмами, станками, поточными линиями, а также контроль за ними.

Если электроника зародилась несколько десятилетий назад, то электротехника и электроэнергетика имеют значительно больший срок жизни.

В царской России из-за ее экономической отсталости электротехническая промышленность и электроэнергетика были слабо развиты.

Быстрое развитие электроэнергетики и электротехнической промышленности нашей Родины началось лишь после Великой Октябрьской социалистической революции.

В условиях социалистического государства электрификация является надежным фундаментом для непрерывного увеличения производительности труда, развития народного хозяйства и роста благосостояния трудящихся.

С первых дней установления Советской власти электрификации страны было уделено исключительное внимание.

В 1920 г. по инициативе В. И. Ленина был разработан государственный план электрификации России — план ГОЭЛРО.

План ГОЭЛРО предусматривал сооружение 30 новых районных электростанций (10 гидравлических и 20 тепловых) общей мощностью 1,5 млн. кВт и увеличение мощности действовавших электростанций на 250 тыс. кВт. План был рассчитан на 15 лет и был выполнен досрочно.

В последующие годы были осуществлены пятилетние планы индустриализации нашей страны и успешно проведены огромные работы по электрификации.

В Директивах XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971—1975 годы предусмотрено довести производство электроэнергии до 1030—1070 млрд. кВт·ч и развить атомную энергетику путем строительства крупных электростанций с установкой реакторов единичной мощностью 1 млн. кВт и выше. Ввести в действие на электростанциях мощности в размере 65—67 млн. кВт, главным образом, путем строительства тепловых электростанций с установкой на них крупных энергетических блоков, а также мощности на атомных электростанциях в размере 6—8 млн. кВт.

Продолжить работы по созданию Единой энергетической системы страны, дальних линий электропередачи переменного тока напряжением 750 и 1150 тыс. в и постоянного тока напряжением 1500 тыс. в, а также по развитию электрических сетей в сельских районах, повысить надежность электроснабжения сельских потребителей.

Повысить производительность труда в электроэнергетике за пятилетие в 1,4 раза.

В настоящее время на основе электрификации все шире внедряется комплексная механизация и автоматизация производственных процессов. Интенсивно развивается электротехнология — электротермические и электролитические способы получения и обработки металлов. С каждым годом вступают в строй все новые и новые автоматические линии машин, цехи и заводы-автоматы. С помощью электроэнергии осуществляется электросварка, закалка стали токами высокой частоты.

Электричество освобождает людей от тяжелого физического труда.

Современная электроника позволяет создавать миниатюрные устройства для вычислительных машин, различных автоматов, управления производственными процессами и контроля за ними.

Обширнейшее применение электротехники во всех отраслях производства и все большее внедрение электроники в промышленность и другие отрасли народного хозяйства настоятельно требуют знания молодыми рабочими основных вопросов, рассматриваемых в данном учебнике.

ГЛАВА I ЭЛЕКТРОСТАТИКА

§ 1. ПОНЯТИЕ ОБ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕОРИИ СТРОЕНИЯ ВЕЩЕСТВА

Вещества как простые, так и сложные состоят из молекул, а молекулы — из атомов.

Простые вещества — медь, алюминий, цинк, свинец и др. — образуются из одинаковых атомов данного вещества.

Это значит, что молекулы меди содержат только атомы меди, а молекулы алюминия — только атомы алюминия. Молекулы сложных веществ образованы из атомов различных химических элементов. Например, молекулы поваренной соли (хлористого натрия) состоят из атомов хлора и атомов натрия. Молекулы воды содержат атомы водорода и атомы кислорода и т. д.

По своим размерам и весу молекулы и атомы очень малы. Диаметр атома наиболее легкого элемента — водорода примерно равен

$$\frac{1}{100\,000\,000} \text{ см} = 1 \cdot 10^{-8} \text{ см.}$$

Если бы удалось уложить атомы водорода в один ряд, то на отрезке длиной 1 см их поместилось бы сто миллионов.

Вес атома меди составляет $10 \cdot 10^{-22}$ г. В 1 см³ меди содержится $8 \cdot 10^{23}$ атомов, т. е. это число выражается цифрой 8 с 22 нулями.

Каждый атом имеет ядро, состоящее из протонов, нейтронов и других частиц. Вокруг ядра движутся по определенным орбитам электроны. Размеры электронов, протонов и других частиц атомов измеряются единицами, во много раз меньшими миллиметра.

$$1 \text{ микрон (мкм)} = \frac{1}{1000} \text{ мм} = 10^{-6} \text{ м. } 1 \text{ миллимикрон (ммкм)} =$$

$$= \frac{1}{1000} \text{ мкм; } 1 \text{ ангстрем (Å)} = \frac{1}{10} \text{ ммкм.}$$

Вес электрона меньше веса протона примерно в 1840 раз.

В обычном состоянии атомы веществ содержат равное количество электронов и протонов. Так, атом водорода содержит один электрон и один протон, а атом селена имеет 34 электрона и 34 протона. Электроны и протоны являются частицами материи, имею-

щими электрический заряд. Электроны обладают отрицательным, а протоны — положительным электрическим зарядом.

Число электронов, содержащихся в атомах химических элементов, совпадает с номером каждого элемента в периодической системе Д. И. Менделеева. Заряды электронов и протонов по величине одинаковы.



Рис. 1. Схема строения атома алюминия

Рассмотрим в качестве примера структуру атомов некоторых металлов.

Схему строения атома алюминия, расположенного в таблице Менделеева под номером 13 (рис. 1), можно представить в виде ядра, в котором имеется 13 протонов. Вокруг ядра на трех электронных оболочках* размещены 13 электронов. На первой оболочке (слое) находятся два электрона, на второй — восемь, на третьей, наиболее удаленной от ядра, — три электрона.

Атом меди содержит 29 электронов и такое же количество протонов. Электроны атомов меди расположены вокруг ядра на четырех оболочках. На первой находятся два электрона, на второй — восемь, на третьей — восемнадцать, на четвертой, наиболее удаленной от ядра, — один электрон. Число электронов, расположенных на наиболее удаленной от ядра оболочке, совпадает с номером группы данного элемента в периодической системе Д. И. Менделеева, а общий отрицательный заряд электронов атома равен положительному заряду протонов, содержащихся в ядре. Равные по величине положительные и отрицательные заряды по отношению к внешней среде электрически уравниваются — взаимно нейтрализуются. В результате этого атомы вещества в обычном состоянии электрически нейтральны.

§ 2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЗАРЯДОВ. ЗАКОН КУЛОНА

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

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

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

* Электронная оболочка — область, внутри которой движутся электроны.

где F — сила взаимодействия зарядов, н (ньютон*),
 q_1, q_2 — количество электричества каждого заряда, к (кулон**),
 r — расстояние между зарядами, м,
 ϵ_0 — абсолютная диэлектрическая проницаемость среды (материала); эта величина характеризует электрические свойства той среды, в которой находятся взаимодействующие заряды.

В Международной системе единиц (СИ) ϵ_0 измеряется в фарадах (ф/м). Абсолютная диэлектрическая проницаемость среды

$$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon,$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная, равная абсолютной диэлектрической проницаемости вакуума (пустоты). Она равна $8,86 \cdot 10^{-12}$ ф/м.

Величина ϵ , показывающая, во сколько раз в данной среде электрические заряды взаимодействуют между собой слабее, чем в вакууме (табл. 1), называется *диэлектрической проницаемостью*.

Величина ϵ есть отношение абсолютной диэлектрической проницаемости данного материала к диэлектрической проницаемости вакуума:

$$\epsilon = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_0} \quad (2)$$

Для вакуума $\epsilon = 1$. Диэлектрическая проницаемость воздуха практически равна единице.

Таблица 1
Диэлектрическая проницаемость некоторых материалов

Наименование материала	ϵ	Наименование материала	ϵ
Слюда	6—7	Карболит	3,5
Фарфор	6,5	Лакоткань	3,5—3,6
Мрамор	10,1	Резина листовая	2,6—3,5
Бумага парафинированная	2,2	Стекло	5,5—10
Гетинакс	7,8	Эбонит	2,4—4,5

На основании закона Кулона можно сделать вывод, что большие электрические заряды взаимодействуют сильнее, чем малые. С увеличением расстояния между зарядами сила их взаимодействия значительно слабее. Так, с увеличением расстояния между зарядами в 6 раз уменьшается сила их взаимодействия в 36 раз. При сокращении расстояния между зарядами в 9 раз увеличивается сила их взаимодействия в 81 раз. Взаимодействие зарядов также зависит от материала, находящегося между зарядами.

* Один ньютон содержит ≈ 102 г силы.

** Один кулон содержит $6,3 \cdot 10^{18}$ зарядов электрона.

Пример. Между электрическими зарядами $Q_1=2 \cdot 10^{-8}$ к и $Q_2=4,43 \cdot 10^{-8}$ к, расположенными на расстоянии 0,5 м, помещена слюда ($\epsilon=6$). Вычислить силу взаимодействия указанных зарядов.

Решение. Подставляя в формулу $F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r^2}$ значения известных величин, получим:

$$F = \frac{2 \cdot 10^{-8} \cdot 4,43 \cdot 10^{-8}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,86 \cdot 10^{-12} \cdot 6 \cdot 0,5^2} = 0,053 \text{ н.}$$

Если в вакууме электрические заряды взаимодействуют с силой $F_{\text{в}}$, то, поместив между этими зарядами, например, фарфор, их взаимодействие можно ослабить в 6,5 раз, т. е. в ϵ раз. Это значит, что сила взаимодействия между зарядами может быть определена как отношение

$$F = \frac{F_{\text{в}}}{\epsilon} \quad (3)$$

Пример. Одноименные электрические заряды взаимодействуют в вакууме с силой $F_{\text{в}}=0,25$ н. С какой силой будут отталкиваться два заряда, если пространство между ними заполнено бакелитом? Диэлектрическая проницаемость этого материала равна 5.

Решение. Сила взаимодействия электрических зарядов

$$F = \frac{F_{\text{вакуума}}}{\epsilon_{\text{бакелита}}} = \frac{0,25}{5} = 0,05 \text{ н.}$$

Так как один ньютон ≈ 102 г силы, то 0,05 н составляет 5,1 г.

§ 3. ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ТЕЛ

Известно, что электроны находятся на разном расстоянии от ядра атома. В связи с этим, согласно закону Кулона, взаимодействие положительно заряженных протонов ядра с электронами, расположенными в слое, ближайшем к ядру, значительно сильнее взаимодействия протонов с электронами, находящимися в наиболее удаленном слое.

Если от атомов того или иного вещества «оторвать» один или несколько таких слабо связанных (свободных) с ядром электронов, то нарушится электрическое равновесие в атомах и вещество будет заряжено положительным электричеством.

Наоборот, если у атомов вещества количество электронов больше количества протонов, то тело приобретает отрицательный заряд. Атом с отрицательным зарядом называют отрицательным ионом.

Изменить количество электронов в атомах различных твердых материалов (наэлектризовать тела) можно, например, воздействием световой энергии, нагреванием, использованием химических процессов, деформацией кристаллов.

Электризация световой энергией. Профессор А. Г. Столетов в 1888 г. установил, что под действием света из таких материалов, как цинк, алюминий, цезий, натрий, свинец, калий и т. п., вылетают электроны и эти материалы заряжаются положительным электричеством. В этом можно убедиться на опыте.

На стержне электроскопа укрепим полированный диск из цинка. При отсутствии электрического заряда на шпике лепестки электроскопа будут опущены.

Если на диск направить световой поток (рис. 2, а), лепестки электроскопа оттолкнутся и разойдутся на некоторый угол. Это показывает, что диск электроскопа и листочки, прикрепленные к его стержню, зарядились одноименными электрическими зарядами. По углу отклонения листочков можно судить о величине заряда.

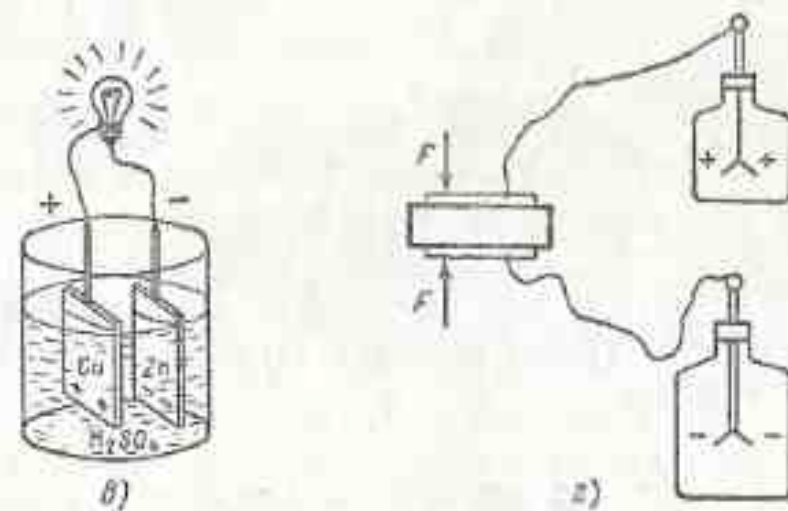
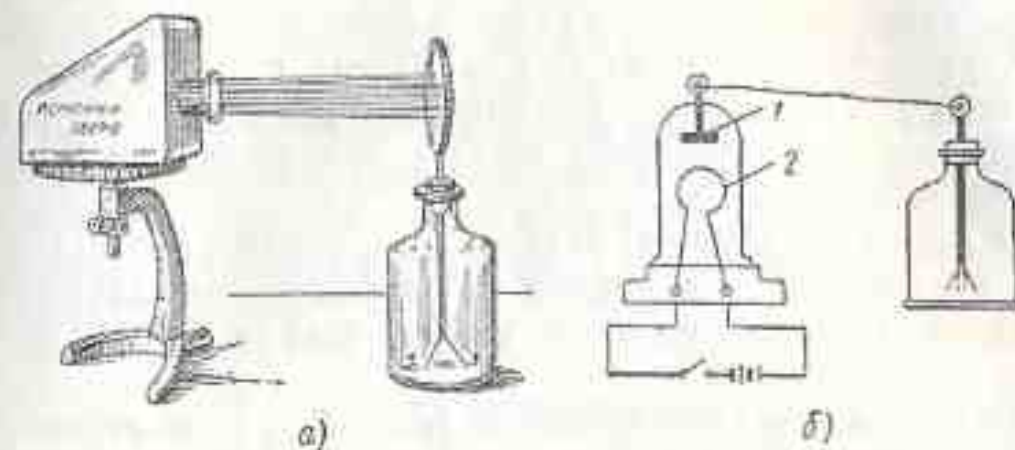


Рис. 2. Приборы, определяющие электризацию тел: а — под действием светового потока, б — при нагревании нити, в — под действием химической реакции, г — под давлением кристалла

Явление, при котором под воздействием света из материалов вырываются электроны, называется *фотоэффектом*. На использовании его основано действие фотоэлементов (см. гл. XIV).

Электризация нагреванием. При сильном нагревании металлов электроны приобретают такую энергию, что вылетают за пределы нагретого металла. В результате этого металл «теряет» электроны и заряжается положительно.

Если к металлической пластинке 1, помещенной в вакууме (рис. 2, б), присоединить электроскоп и нагреть нить 2, то лепестки электроскопа, отталкиваясь друг от друга, разойдутся на некоторый угол. Это объясняется тем, что из накаленной нити вылетают электроны. Через пластинку 1 они попадают на электроскоп и заряжают его.

Явление, при котором из сильно нагретых металлов в окружающую среду вылетают электроны, называется *термоэлектронной эмиссией*. На использовании этого явления основана работа электронных ламп (см. гл. XIII).

Электризация при химической реакции. В химических источниках электрической энергии (элементах, аккумуляторах) имеются два полюса: «+» и «-». Положительные и отрицательные заряды в них образуются в результате химических реакций окисления и восстановления, происходящих внутри элементов (рис. 2, в) и аккумуляторов. При окислении атомы вещества отдают электроны. В этом случае атомы и вещество в целом приобретают положительный заряд «+». При химической реакции восстановления атомы вещества присоединяют к себе электроны и приобретают отрицательный заряд «-».

Электризация давлением. Материалы, у которых под действием давления возникают электрические заряды, называются *пьезоэлектриками**. К ним относятся кварц, сегнетовая соль, фосфат аммония и др.

Если пластинку пьезоэлектрика (рис. 2, г) поместить между двумя электродами и давить на нее с силой F , то одна грань ее электризуется положительным электрическим зарядом, а противоположная — отрицательным.

При изменении направления действия сил — при растягивающем усилии — знак заряда на пьезоэлектрике изменяется. Это связано с тем, что под действием механической силы электрические заряды атомов вещества смещаются. Чем больше усилие, действующее на пьезоэлектрик, тем сильнее он электризуется. Свойства электризации пьезоэлектрика используются в автоматике и других областях новой техники.

§ 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Пространство, в котором обнаруживается действие каких-либо сил, можно назвать полем этих сил. Пространство, в котором на электрически заряженные частицы и тела действует сила, соответственно называется *электрическим полем*.

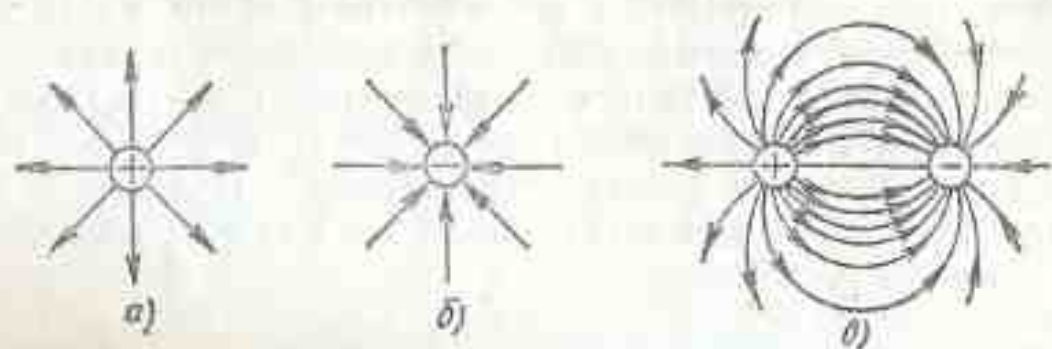


Рис. 3. Условное обозначение электрического поля: а — положительного заряда, б — отрицательного заряда, в — двух разноименных зарядов

* Пьезо — греческое слово, означает «давить».

Электрическое поле неотделимо от заряда, существует вместе с ним и окружает его. Под действием сил электрического поля происходит рассмотренное выше взаимодействие зарядов — их взаимное притяжение и отталкивание.

Электрическое поле возникает вокруг заряда в любой среде и даже в вакууме.

Поле всякого заряженного тела складывается из полей, принадлежащих отдельным элементарным зарядам — электронам и протонам.

Если в электрическое поле поместить пробный положительный заряд, то силы этого поля окажут на него воздействие, стремясь переместить его в определенном направлении.

Линия, по которой будет перемещаться пробный положительный заряд под действием сил электрического поля, называется *силовой линией*. Электрическое поле изображается при помощи силовых линий (рис. 3).

§ 5. ПОТЕНЦИАЛ

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

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

Величина, определяющая запас энергии (потенциальную энергию) единицы количества электричества, находящейся в данной точке электрического поля, называется *потенциалом*.

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

Таким образом,

$$\varphi = \frac{A}{q} \quad (4)$$

Работа A сил электрического поля определяется произведением силы на путь

$$A = FS,$$

где F — сила, н,

S — путь, м,

A — работа, н·м,

q — количество электричества, к.

Подставив эти величины в формулу $\varphi = \frac{A}{q}$, получим: $[\varphi]^* = \frac{\text{ньютон} \cdot \text{метр}}{\text{кулон}}$. Поскольку $1 \text{ н} \cdot 1 \text{ м} = 1 \text{ дж}$, то $[\varphi] = \frac{\text{джоуль}}{\text{кулон}}$. Единица

* Знак $[\varphi]$ объясняет размерность приведенных величин.

дж/к называется вольт (в). Следовательно, потенциал измеряется в вольтах.

Пример. Определить потенциал точки электрического поля, в которую из бесконечности внесен заряд $q=3 \cdot 10^{-6}$ к, если при этом силами поля совершена работа $A=6 \cdot 10^{-6}$ дж.

Решение. Потенциал точки электрического поля

$$\varphi = \frac{A}{q} = \frac{6 \cdot 10^{-6}}{3 \cdot 10^{-6}} = 2 \text{ в.}$$

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

Потенциал различных точек электрического поля обычно сравнивают с потенциалом земли, который принято считать равным нулю (подобно тому, как температуру любого тела сравнивают с температурой таяния льда). Это значит, что потенциал проводника, электрически соединенного с землей, равен нулю. Положительный потенциал больше (выше) потенциала земли, а отрицательный потенциал меньше (ниже) потенциала земли.

При перемещении заряда в пределах электрического поля (рис. 4) из точки А в точку В, потенциалы которых соответственно равны φ_A и φ_B , работа, совершаемая силами поля, будет равна разности потенциальной энергии, которой этот заряд обладает в начальной и конечной точках своего пути, т. е. в точках А и В.

Таким образом, работа A заряда выразится формулой

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

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

Пример. Пусть в точке А электрического поля потенциал относительно земли $\varphi_A = 15$ в, в точке В потенциал $\varphi_B = 10$ в, а в точке В потенциал $\varphi_B = -2$ в. Следовательно, разность потенциалов — напряжение между этими точками:

$$\varphi_A - \varphi_B = U_{AB} = 15 - 10 = 5 \text{ в;}$$

$$\varphi_B - \varphi_B = U_{BB} = 10 - (-2) = 12 \text{ в;}$$

$$\varphi_B - \varphi_A = U_{BA} = -2 - 15 = -17 \text{ в.}$$

Нетрудно понять, что при перемещении заряда из одной точки поля в другие указанные точки совершается различная работа. Это связано с тем, что между этими точками поля разность электрических потенциалов различная. Вычислим работу сил электрического поля, совершаемую при перемещении заряда $q=5$ к из точки А в точку В, из точки В в точку В:

$$A_{AB} = qU_{AB} = 5 \cdot 5 = 25 \text{ дж;}$$

$$A_{BB} = qU_{BB} = 5 \cdot 12 = 60 \text{ дж.}$$

Из сказанного следует, что напряжение между двумя точками поля равно по величине работе, совершаемой под действием сил электрического поля, при перемещении единицы электрического заряда из одной точки поля в другую.

§ 6. НАПРЯЖЕННОСТЬ ПОЛЯ

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

Следовательно, напряженность поля

$$E = \frac{F}{q}, \quad (5)$$

где F — сила действия электрического поля на заряд q ;
 q — величина электрического заряда, к.

Известно, что работа сил электрического поля равна произведению силы на путь.

$$A = FS.$$

Из этого выражения следует, что сила

$$[F] = \frac{[A]}{[S]} = \frac{\text{джоуль}}{\text{метр}} \quad (\text{дж/м}). \quad (6)$$

Подставив это выражение в формулу $E = \frac{F}{q}$, получим, что напряженность электрического поля $[E] = \frac{\text{джоуль}}{\text{метр} \cdot \text{кулон}}$.

Так как $\frac{\text{джоуль}}{\text{кулон}} = \text{вольт}$, то напряженность электрического поля

$$[E] = \frac{\text{вольт}}{\text{метр}} \quad (\text{в/м}). \quad (7)$$

Пример. Вычислим напряженность двух различных электрических полей, действующих на заряд $q=0,004$ к с силой $F_1=0,08$ н и $F_2=0,012$ н.

Напряженность первого поля

$$E_1 = \frac{F_1}{q} = \frac{0,08}{0,004} = 20 \text{ в/м.}$$

Напряженность второго поля

$$E_2 = \frac{F_2}{q} = \frac{0,012}{0,004} = 3 \text{ в/м.}$$

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

Напряженность электрического поля характеризует поле в какой-либо одной точке посредством силы, действующей на единичный заряд, внесенный в эту точку, а напряжение — это разность потенциалов между двумя точками электрического поля, т. е.

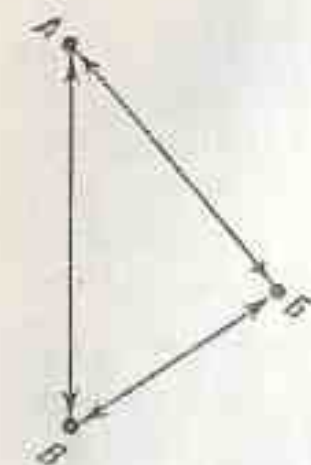


Рис. 4. Разность потенциалов между различными точками электрического поля

работа, совершаемая силами поля при перемещении единичного заряда из одной точки в другую.

Примером практического использования свойств электрического поля и взаимодействия электрических зарядов может служить окрашивание промышленных изделий в электрическом поле.

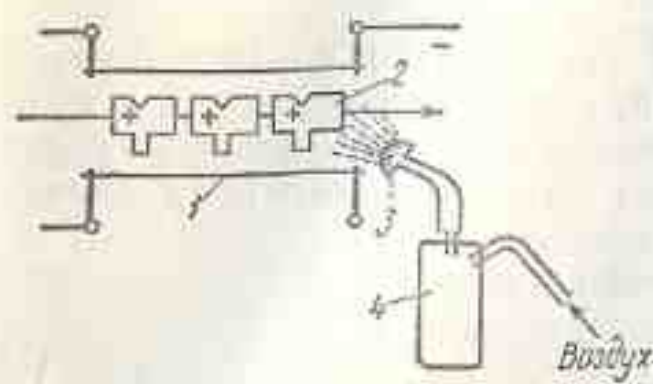


Рис. 5. Упрощенная схема окрашивания изделий в электрическом поле

Известно, что для защиты металлических изделий от коррозии наряду с другими способами в промышленности применяют окрашивание готовой продукции.

За последнее время широкое распространение получило окрашивание изделий в электрическом поле (рис. 5). Отрицательный полюс источника электрической энергии высокого напряжения (100—150 кВ) соединяют с электродами 1, вокруг которых возникает электрическое поле.

Между электродами в электрическом поле перемещаются на конвейере изделия 2. Направление их перемещения показано стрелкой. Конвейер и изделия, укрепленные на нем, имеют положительную полярность.

Навстречу перемещаемым изделиям из бака 4 с красителем через распылитель 3 поступает под определенным углом распыленная краска. Частицы краски электризуются в электрическом поле отрицательным зарядом, под действием сил поля притягиваются к окрашиваемому изделию, имеющему положительный потенциал, и плотно покрывают его равномерным слоем.

После окраски изделия поступают в сушильное устройство.

При окрашивании изделий в электрическом поле подается под небольшим давлением сжатый воздух, который распыляет распылитель. Направление распыления частиц краски на поверхность окрашиваемого изделия осуществляется под воздействием электрического поля.

Окрашивание изделий в электрическом поле по сравнению с обычным методом покраски позволяет значительно повысить производительность окрашивания изделий, экономить красящие материалы на 40—50%, наносить слой краски необходимой толщины. При этом достигается полная автоматизация процесса и исключается необходимость пребывания рабочего в зоне опыления изделия краской, что резко улучшает условия труда.

§ 7. ПОНЯТИЕ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ТОКЕ

В металлах вокруг ядра каждого атома электроны, движущиеся по внешним орбитам, слабо связаны с ядром. Часть этих электронов, оторвавшись от своих ядер, находится в беспорядочном движении. Такие электроны принято называть *свободными*.

Действием сил электрического поля можно упорядочить перемещение свободных электронов.

Движение (дрейф) свободных электронов в определенном направлении называется *электрическим током**

Сила тока определяется количеством электричества, проходящего через поперечное сечение проводника в секунду. Сила электрического тока измеряется в амперах. Один ампер — это сила тока, при которой через поперечное сечение проводника в секунду проходит один кулон электричества, т. е. $6,3 \cdot 10^{18}$ электронов.

Пример. За время $t=300$ сек по проводнику прошло 30 Кл электричества. Определить силу тока в этом проводнике.

Решение. Сила тока $I = \frac{q}{t} = \frac{30}{300} = 0,1$ а. Для измерения малой силы тока применяют единицы: миллиампер (мА) и микроампер (мкА).

$$1 \text{ а} = 1000 \text{ мА}, 1 \text{ а} = 1\,000\,000 \text{ мкА}.$$

Сила тока измеряется приборами: амперметром, миллиамперметром и микроамперметром.

Условно принято считать, что электрический ток в металлах течет в направлении, противоположном перемещению свободных электронов.

§ 8. ПРОВОДНИКИ И ДИЭЛЕКТРИКИ

Перемещение электронов в определенном направлении и возникновение электрического тока возможно не во всех материалах. Так, если соединить палочкой из резины, фарфора или стекла два электроскопа, заряженных разноименными электрическими зарядами, то заряды на шарах электроскопов сохраняются и листочки электроскопов не опустятся. Это объясняется тем, что в таких материалах, как, например, фарфор, резина, мрамор, слюда, свободных электронов практически нет, а все имеющиеся электроны прочно связаны с ядром. Поэтому электрические поля зарядов не могут вызвать перемещения электронов в определенном направлении и по таким материалам электрический ток не проходит. Эти материалы называются *непроводниками* — *диэлектриками*.

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

Если же эти заряженные электроскопы соединить металлической проволокой, то заряды на шарах электроскопов исчезнут и их листочки опустятся. Это связано с тем, что в металлах много свободных электронов и под действием сил электрического поля происходит перемещение электрических зарядов с шара, имеющего избыток электронов («—»), к шару с недостатком электронов («+»), и по металлу будет протекать электрический ток.

* Такое определение электрического тока справедливо только для твердых (металлических) проводников.

Материалы, проводящие электрический ток, называются *проводниками*. К ним относятся металлы, растворы солей, кислот и щелочей, уголь, графит и др.

§ 9. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ. КОНДЕНСАТОРЫ

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

В технике широко применяют *конденсаторы* — устройства, которые при сравнительно малых размерах способны накапливать значительные электрические заряды. Они используются в энергетических установках, в устройствах электроники, автоматики и др.

Плоский конденсатор в простейшем виде состоит из двух металлических пластин-обкладок, разделенных диэлектриком, например воздухом, слюдой, парафинированной бумагой и др.

В зависимости от вида диэлектрика конденсатор называют бумажным, слюдяным, воздушным и т. д.

Электрическая емкость конденсатора определяется отношением величины заряда на его пластинах к напряжению между ними. Следовательно, электрическая емкость

$$C = \frac{q}{U}. \quad (8)$$

Электрическая емкость измеряется в фарадах. Емкость конденсатора равна одной фараде, если увеличение его заряда на один кулон электричества вызывает повышение напряжения между его обкладками на один вольт.

Фарада — очень крупная единица емкости, которая практически не применяется. Обычно пользуются более мелкими единицами емкости: микрофарадой (*мкф*) и пикофарадой (*пф*).

Фарада содержит миллион микрофард: $1 \text{ ф} = 10^6 \text{ мкф}$. Микрофарада содержит миллион пикофард: $1 \text{ мкф} = 10^6 \text{ пф}$.

Емкость конденсатора зависит от площади его пластин. При одном и том же напряжении и одинаковом расстоянии между пластинами конденсатор, у которого пластины имеют большую площадь, заряжается большим количеством электричества и в связи с этим обладает большей емкостью, чем такой же конденсатор с тем же диэлектриком, но с пластинами малого размера.

Емкость конденсатора зависит от расстояния между его пластинами (от толщины диэлектрика). Конденсатор, у которого пластины находятся на большом расстоянии друг от друга, обладает меньшей емкостью, чем такой же конденсатор, пластины которого сближены. Это объясняется тем, что при малом расстоянии между пластинами взаимодействие их разноименных зарядов сильнее, а потому конденсатор накапливает большее количество электричества.

Емкость конденсатора зависит от свойств материала диэлектрика — от его диэлектрической проницаемости. Например, при равных размерах пластин и равном расстоянии между ними конденсатор,

у которого диэлектриком является слюда, имеет примерно в шесть раз большую емкость, чем конденсатор с воздушным диэлектриком. При тех же условиях бумажный конденсатор имеет в 2,2 раза большую емкость, чем воздушный, но меньшую, чем слюдяной.

Для вычисления емкости плоского конденсатора, имеющего две пластины, служит формула

$$C = 0,09 \frac{\epsilon S}{d}, \quad (9)$$

где C — емкость конденсатора, *пф*,

S — поверхность одной пластины, *см²*,

d — расстояние между пластинами, *см*,

ϵ — диэлектрическая проницаемость (см. табл. 1),

0,09 — постоянный коэффициент, переводящий емкость в пикофарады.

Пример. Конденсатор имеет две пластины. Площадь каждой пластины составляет 15 см^2 . Между пластинами помещен диэлектрик — парафинированная бумага толщиной $0,02 \text{ см}$. Вычислить емкость этого конденсатора.

Решение. Из табл. 1 следует, что диэлектрическая проницаемость парафинированной бумаги $\epsilon = 2,2$.

Емкость конденсатора

$$C = \frac{\epsilon S}{d} \cdot 0,09 = \frac{2,2 \cdot 15}{0,02} \cdot 0,09 = 1650 \text{ пф}.$$

§ 10. ЗАРЯД И РАЗРЯД КОНДЕНСАТОРА

Конденсатор накапливает электрические заряды — заряжается. Накопление зарядов происходит в том случае, если конденсатор подключить к источнику электрической энергии.

Процесс заряда конденсатора (рис. 6). При установке ключа на контакт I пластины конденсатора окажутся подключенными к батарее и на них появятся противоположные по знаку электрические заряды («+» и «-»). Произойдет заряд конденсатора и между его пластинами возникнет электрическое поле. При заряде конденсатора свободные электроны правой пластины переместятся по проводнику в направлении положительного полюса батареи и на этой пластине останется недостаточное количество электронов, в результате чего она приобретет положительный заряд.

Свободные электроны с отрицательного полюса батареи пере-

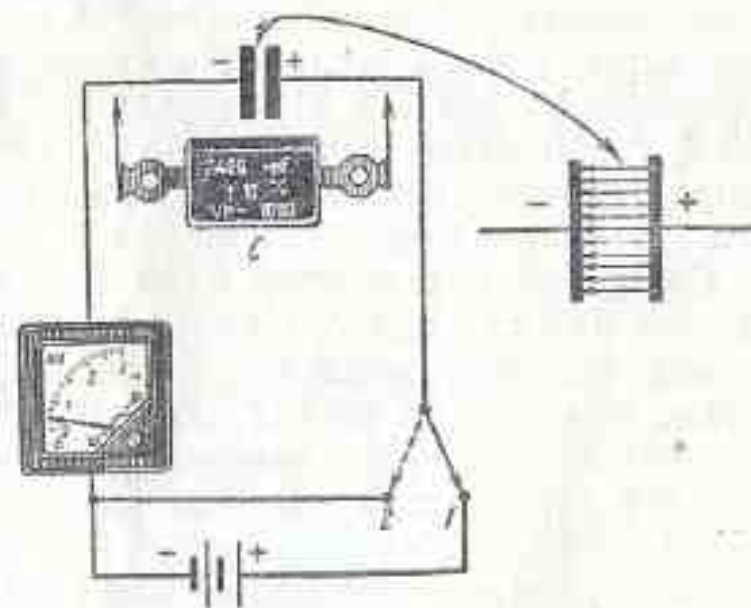


Рис. 6. Схема заряда и разряда конденсатора

местятся на левую пластину конденсатора и на ней появится избыток электронов — отрицательный заряд.

Таким образом, в проводах, соединяющих пластины конденсатора с батареей, будет протекать электрический ток. Если между конденсатором и батареей не включено большое сопротивление, то время заряда конденсатора очень мало и ток в проводах протекает кратковременно.

При заряде конденсатора энергия, сообщаемая батареей, переходит в энергию электрического поля, возникающего между пластинами конденсатора.

Процесс разряда конденсатора (см. рис. 6). Если ключ установить на контакт 2, пластины заряженного конденсатора окажутся соединенными между собой. При этом произойдет разряд конденсатора и исчезнет электрическое поле между его пластинами.

При разряде конденсатора избыточные электроны с левой пластины переместятся по проводам к правой пластине, где их недостает, когда количество электронов на пластинах конденсатора станет одинаковым, процесс разряда закончится и ток в проводах исчезнет.

Энергия электрического поля конденсатора при его разряде расходуется на работу, связанную с перемещением зарядов, — на создание электрического тока.

Время разряда конденсатора через провода, обладающие малым сопротивлением, также весьма мало.

Процесс заряда и разряда конденсатора широко используется в различных устройствах.

Наиболее широко распространены бумажные, слюдяные и электролитические конденсаторы постоянной емкости.

Бумажный конденсатор КБГ. Бумажный конденсатор (рис. 7) представляет собой металлический корпус 1, в котором герметически закрыт пакет 2, состоящий из пластин, выполненных в виде алюминиевой фольги 5 и изолированных одна от другой тонкой бумагой 4, пропитанной изоляционным материалом (церезином, гололаком). Пластины конденсатора присоединяются к выводным лепесткам 3, изолированным от корпуса.

Слюдяной конденсатор КСО. Слюдяной конденсатор (рис. 7, б) состоит из двух пакетов металлических пластин и слюдяных прокладок. Между каждой парой пластин, принадлежащих разным пакетам, помещается тонкая прокладка из слюды. Собранные таким образом конденсаторы запрессовываются в пластмассу, из которой выходят наружу два лепестка по одному от каждого пакета пластин. Они служат для включения конденсатора в схему.

Электролитический конденсатор КЭ-2М. Электролитический конденсатор (рис. 7, в) представляет собой алюминиевый стакан 6, в котором помещаются две алюминиевые ленты, скатанные в рулон. Между лентами проложена фильтровальная бумага, пропитанная электролитом. Одна алюминиевая лента соединяется с корпусом стакана, а вторая — с контактом 7, укрепленным на его верхней крышке. При заряде конденсатора на поверхности алюминиевых

лент, подключаемых к положительному полюсу источника тока, образуется пленка окиси алюминия, являющаяся диэлектриком. Так как эта пленка очень тонкая, то емкость электролитических

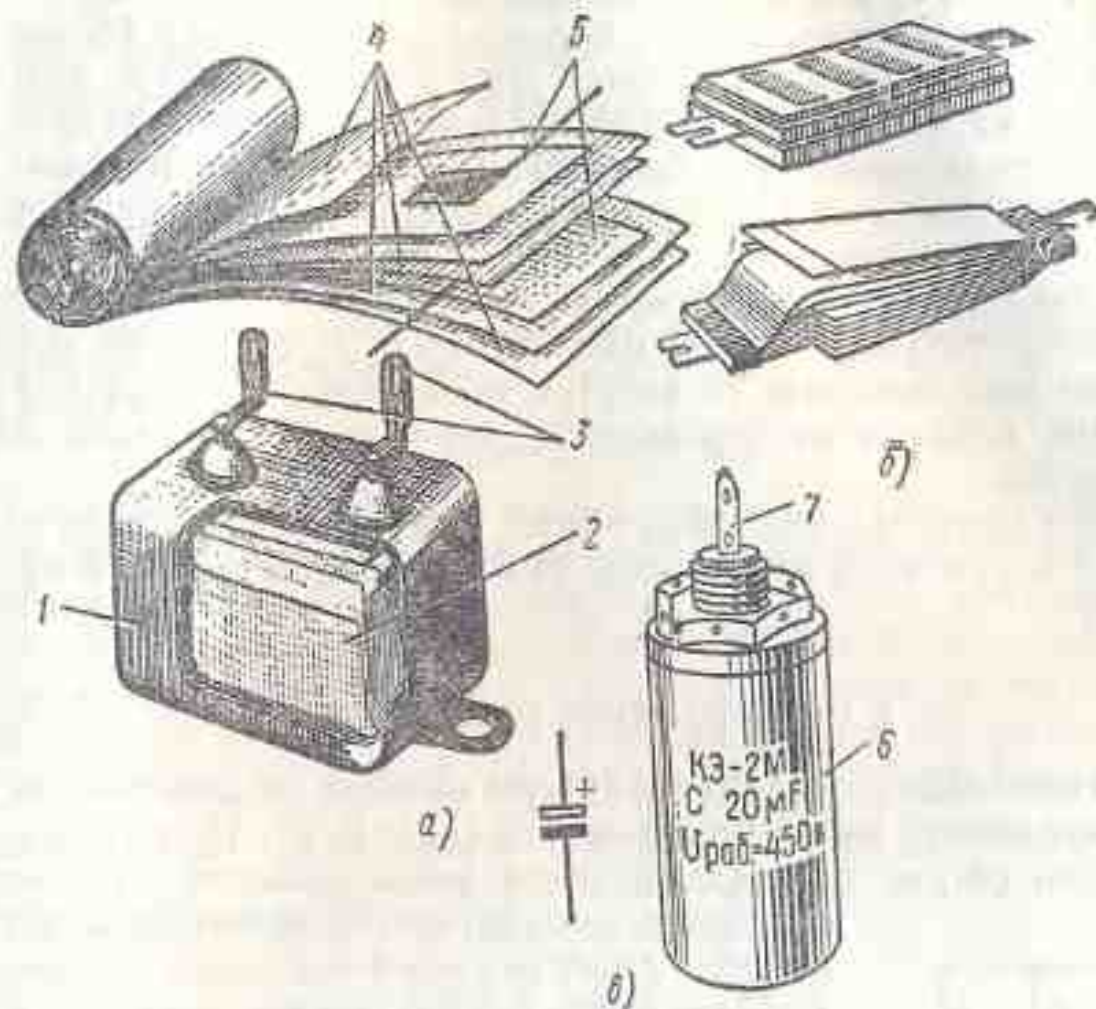


Рис. 7. Конденсаторы постоянной емкости:
а — бумажный КБГ, б — слюдяной КСО, в — электролитический КЭ-2М и его условное обозначение

конденсаторов относительно велика. Электролитические конденсаторы изготовляют емкостью до 2000 мкф при рабочем напряжении до 500 в.

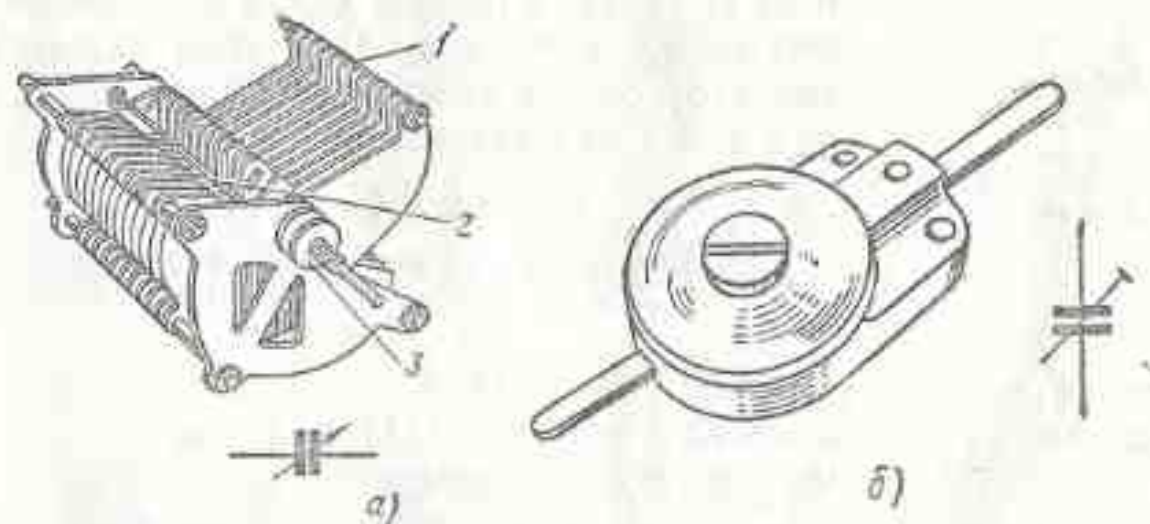


Рис. 8. Конденсаторы переменной (а) и полупеременной (б) емкости и их условное обозначение:
1 — ротор, 2 — статор, 3 — гайка крепления

Конденсаторы переменной емкости. Конденсаторы, емкость которых можно изменять, называются *конденсаторами переменной емкости* (рис. 8, а). Такой конденсатор состоит из неподвижных пластин (статора) и подвижных пластин (ротора), укрепленных на оси. При плавном повороте оси подвижные пластины в большей или меньшей степени входят в промежутки между неподвижными пластинами, не касаясь их, и емкость конденсатора плавно увеличивается. Когда подвижные пластины полностью входят в промежутки между неподвижными пластинами, емкость конденсатора достигает наибольшей величины.

Разновидностью конденсатора переменной емкости является *конденсатор полупеременной емкости* (рис. 8, б). Такой конденсатор имеет неподвижную (статор) и подвижную (ротор) пластины. Основание пластин изготовлено из керамики, а на него нанесен слой серебра.

Ротор укреплен с помощью винта. Поворачивая винт, перемещают ротор и при этом изменяется емкость конденсатора в пределах 2—30 пф.

§ 11. СОЕДИНЕНИЯ КОНДЕНСАТОРОВ

Если необходимо увеличить общую емкость конденсаторов, то их соединяют между собой параллельно (рис. 9, а). При этом способе соединения общая площадь пластин увеличивается по сравнению с площадью пластины каждого конденсатора. *Общая емкость конденсаторов, соединенных параллельно, равна сумме емкостей отдельных конденсаторов* и вычисляется по формуле

$$C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots \quad (10)$$

Это можно подтвердить следующим образом.

Соединенные параллельно конденсаторы находятся под одним и тем же напряжением, равным U вольт, а общий заряд этих конденсаторов равен q кулонов. При этом каждый конденсатор соответственно получает заряд q_1 , q_2 , q_3 и т. д. Следовательно,

$$q_{\text{общ}} = q_1 + q_2 + q_3 + \dots$$

Из формулы (8) вытекает, что заряд

$$q_{\text{общ}} = C_{\text{общ}} U, \quad (11)$$

а заряды $q_1 = C_1 U$; $q_2 = C_2 U$; $q_3 = C_3 U$.

Подставив эти выражения в формулу (11), получим:

$$C_{\text{общ}} U = C_1 U + C_2 U + C_3 U.$$

Разделив левую и правую части этого равенства на равную для всех конденсаторов величину U , после сокращения найдем:

$$C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + C_3.$$

Пример. Три конденсатора емкостью $C_1 = 2$ мкф; $C_2 = 0,1$ мкф и $C_3 = 0,5$ мкф соединены параллельно.

Вычислить их общую емкость.

Решение.

$$C_{\text{общ}} = C_1 + C_2 + C_3 = 2 + 0,1 + 0,5 = 2,6 \text{ мкф.}$$

Общую емкость конденсаторов, имеющих одинаковую емкость и соединенных параллельно, можно вычислить по формуле

$$C_{\text{общ}} = Cn, \quad (12)$$

где C — емкость одного конденсатора,

n — число конденсаторов.

Пример. Пять конденсаторов емкостью 2 мкф каждый соединены параллельно. Определить их общую емкость.

Решение.

$$C_{\text{общ}} = Cn = 2 \cdot 5 = 10 \text{ мкф.}$$

Конденсаторы соединяют последовательно (рис. 9, б), когда рабочее напряжение установки превышает напряжение, на которое рассчитана изоляция одного конденсатора. В этом случае правую пластину первого конденсатора соединяют с левой пластиной второго, правую пластину второго — с левой пластиной третьего и т. д. Общая емкость конденсаторов при таком соединении уменьшается. Величина, обратная общей емкости конденсаторов, соединенных последовательно $\frac{1}{C_{\text{общ}}}$, равна сумме обратных величин емкостей отдельных конденсаторов:

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots \quad (13)$$

Это можно подтвердить следующим образом. Общее напряжение на конденсаторах $U_{\text{общ}}$, а на каждом конденсаторе U_1 , U_2 , U_3 , тогда

$$U_{\text{общ}} = U_1 + U_2 + U_3.$$

Из формулы (8) следует, что напряжение

$$U_{\text{общ}} = \frac{q}{C_{\text{общ}}}, \quad (14)$$

а напряжение

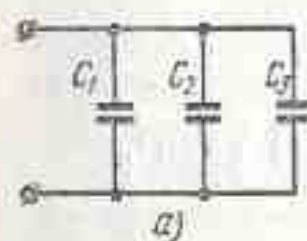
$$U_1 = \frac{q}{C_1}; \quad U_2 = \frac{q}{C_2}; \quad U_3 = \frac{q}{C_3}.$$

Подставив эти выражения в формулу (14), получим:

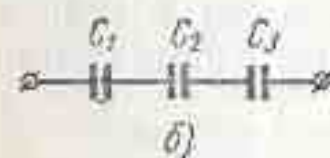
$$\frac{q}{C_{\text{общ}}} = \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3}.$$

Разделим левую и правую части этого равенства на величину q и после сокращения найдем:

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}.$$



а)



б)

Рис. 9. Соединение конденсаторов:

а — параллельное,
б — последовательное

Пример. Три конденсатора $C_1=2$ мкф, $C_2=4$ мкф и $C_3=8$ мкф соединены последовательно. Определить их общую емкость.

Решение.

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{8} = \frac{7}{8},$$

отсюда $C_{\text{общ}} = \frac{8}{7}$ мкф.

Если последовательно соединены конденсаторы, имеющие одинаковую емкость, то их общую емкость можно вычислить по формуле

$$C_{\text{общ}} = \frac{C}{n} \quad (15)$$

Пример. Четыре конденсатора емкостью 1000 пф каждый соединены последовательно. Определить их общую емкость.

Решение.

$$C_{\text{общ}} = \frac{C}{n} = \frac{1000}{4} = 250 \text{ пф.}$$

Таблица 2

Электрическая прочность некоторых диэлектриков

Наименование диэлектрика	Электрическая прочность диэлектрика при постоянном напряжении, в/см
Воздух	30000
Кабельная бумага	60000—90000
Мрамор	20000—30000
Парафин	150000—500000
Слюда	1200000—2000000
Фарфор	60000—100000
Стекло	100000—400000

Если последовательно соединены два конденсатора различной емкости, то их общую емкость можно найти по формуле

$$C_{\text{общ}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (16)$$

Пример. Два конденсатора $C_1=200$ пф и $C_2=300$ пф соединены последовательно. Вычислить их общую емкость.

Решение.

$$C_{\text{общ}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{200 \cdot 300}{200 + 300} = \frac{60000}{500} = 120 \text{ пф.}$$

Как видно из приведенных примеров, общая емкость конденсаторов, соединенных последовательно, всегда меньше наименьшей емкости, входящей в соединение.

Конденсаторы выбирают по емкости и рабочему напряжению, которое подается на его пластины при включении в схему. При на-

пряжении, превышающем допустимое, происходит пробой диэлектрика в конденсаторе. Это напряжение называется пробивным. Пробой диэлектрика сопровождается электрическим разрядом — искрой с характерным треском. Конденсатор с пробитым диэлектриком не пригоден для применения.

Каждый диэлектрик обладает определенной электрической прочностью, т. е. способностью противостоять пробой. Электрическая прочность (табл. 2) измеряется обычно в $\frac{\text{вольты}}{\text{сантиметр}}$ (в/см) и определяется по формуле

$$E_{\text{пр}} = \frac{U}{d} \quad (17)$$

где U — напряжение, в,

d — толщина диэлектрика, см.

§ 12. ПОНЯТИЕ ОБ ЭЛЕКТРОИСКРОВОМ СПОСОБЕ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

Электрические разряды используют для обработки металлов. Советские изобретатели Б. Р. Лазаренко и Н. И. Лазаренко разработали новый электрический способ обработки металлов, который



Рис. 10. Схема переноса металла при электрическом разряде

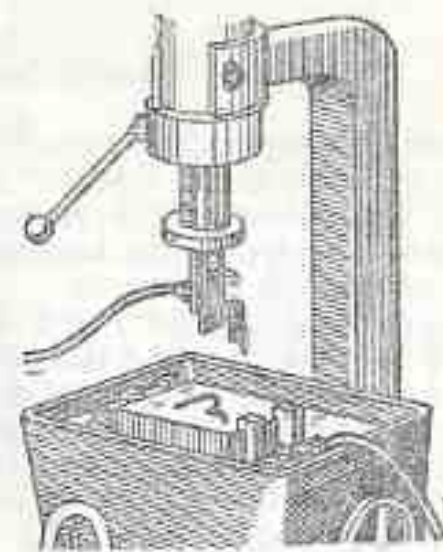


Рис. 11. Станок для электроискровой обработки металлов

назван *электроискровым*. Этот способ основан на том, что при электрическом разряде вместе с искрой с положительного электрода переносятся частицы металла и поэтому на нем образуется впадина, а на отрицательном электроде — выступ (рис. 10).

Поверхностное разрушение электродов под действием электрического разряда называется электрической эрозией.

При электроискровой обработке металлов (рис. 11) деталь помещают в ванну с водой, маслом или керосином и присоединяют к ней положительный полюс источника электрической энергии (анод).

В качестве «инструмента» используют медно-графитовую пластину, имеющую форму того отверстия, которое хотят сделать в обрабатываемой детали. К инструменту подводят отрицательный полюс источника электрической энергии (катод).

Инструмент (катод) приближают к обрабатываемой детали (к аноду), не касаясь ее, до расстояния, при котором начинается пробой — искрообразование. Частицы металла с большой скоростью вырываются из детали (анода) и, направляясь к катоду, попадают в жидкость. Это обеспечивает сохранение формы инструмента. По мере продвижения в массу металла инструмент автоматически опускается, в результате этого между ним и деталью сохраняется нужное для поддержания разряда расстояние.

Через несколько минут после начала обработки изделия в металле большой твердости получается отверстие необходимой формы и размера.

Электронным способом можно делать сквозные и глухие отверстия различной формы, изготавливать различные штампы, пресс-формы, шлифовать поверхности, затачивать и доводить твердосплавные резцы, разрезать металлы различной твердости, наносить покрытия на металлические поверхности, нарезать резьбу и выполнять другие всевозможные виды обработки металлов.

Контрольные вопросы

1. Каким электрическим зарядом обладают электроны?
2. От каких величин зависит сила взаимодействия электрических зарядов?
3. Что называется электрическим полем?
4. Каким электрическим зарядом обладает тело, атомы которого имеют недостаток или избыток электронов?
5. Что называется электрическим потенциалом?
6. Что называется разностью потенциалов?
7. Что называется напряженностью электрического поля?
8. От каких величин зависит емкость плоского конденсатора?
9. Назовите единицы измерения электрической емкости и их соотношение.
10. При каком соединении конденсаторов общая емкость уменьшается?
11. Как вычислить емкость двух конденсаторов, соединенных последовательно, имеющих разную емкость?

ГЛАВА II ПОСТОЯННЫЙ ТОК

§ 13. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Простейшая электрическая цепь (рис. 12) содержит источник электрической энергии Γ , приемник энергии Π и два линейных провода \mathcal{L}_1 и \mathcal{L}_2 , соединяющих источник с приемником энергии. Линейные провода присоединяются к источнику электрической энергии при помощи двух зажимов, называемых положительным (+) и отрицательным (—) полюсами.

Источник электрической энергии преобразует механическую, химическую, тепловую или другого вида энергию в энергию электрическую. В приемнике происходит преобразование электрической энергии в энергию другого вида — механическую, тепловую, химическую, световую и др.

Источниками электрической энергии служат генераторы (электрические машины, приводимые в движение какими-либо механическими двигателями), аккумуляторы и гальванические элементы, условное обозначение которых показано на рис. 13. В качестве приемников электрической энергии применяют осветительные лампы, электрические двигатели, электронагревательные приборы и пр.

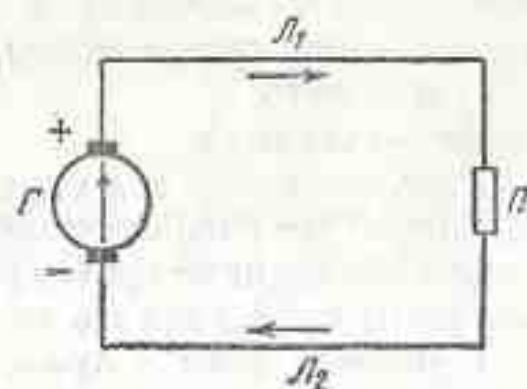


Рис. 12. Простейшая электрическая цепь

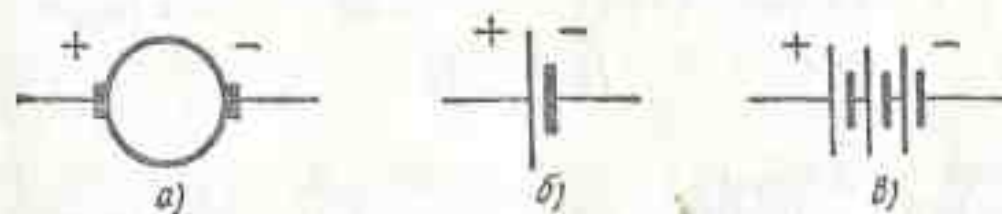


Рис. 13. Условное обозначение:
а — генератора постоянного тока, б — аккумуляторов и гальванических элементов, в — батарей аккумуляторов и гальванических элементов

Как гальванические элементы, так и аккумуляторы соединяют между собой для составления в первом случае батареи гальванических элементов, а во втором — батареи аккумуляторов. Источник электрической энергии с присоединенными к нему линейными проводниками и приемником энергии образуют замкнутую электрическую цепь, по которой происходит непрерывное движение электричества, называемое *электрическим током*.

Постоянный ток в металлических проводниках представляет собой установившееся поступательное движение свободных электронов в замкнутой цепи.

Сила тока, протекающего в двух проводниках, отстоящих друг от друга на определенном расстоянии, вызывает механические силы, действующие на эти проводники. Единицей измерения силы тока является ампер (*a*). В Международной системе единиц (СИ) *ампер* — сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого круглого сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ ньютона (*n*) на каждый метр длины.

Единицей силы в Международной системе единиц является ньютон (*n*): $n = \frac{кг \cdot м}{сек^2}$,

где *кг* — килограмм массы,

м — метр,

сек — секунда.

Электрический ток определяет количество электричества, протекающего через поперечное сечение проводника в единицу времени. Если в проводнике протекает ток силой 1 *a*, то через поперечное сечение этого проводника в течение 1 *сек* протекает 1 *к* электричества.

При силе тока в проводнике *I* за время *t* через поперечное сечение этого проводника протекает количество электричества, равное

$$Q = It,$$

откуда

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

Эта зависимость справедлива для случая, когда в течение времени *t* сила тока остается неизменной.

Таким образом, если через поперечное сечение проводника протекает 40 *к* электричества за 5 *сек*, то сила тока в цепи

$$I = \frac{40}{5} = 8a.$$

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

Внутри источника, иначе во внутренней цепи, ток возникает под действием электродвижущей силы и протекает от отрицательного зажима источника энергии к положительному.

§ 14. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА

Как было указано выше, в замкнутой цепи электрический ток протекает под действием электродвижущей силы (э. д. с.) источника энергии.

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

Как при замкнутой, так и при разомкнутой электрической цепи э. д. с. непрерывно поддерживает разность потенциалов на зажимах источника энергии. Для непрерывного протекания тока в замкнутой цепи необходимо движение зарядов внутри источника тока в направлении, обратном действию сил поля.

Такое перемещение зарядов происходит за счет энергии, вырабатываемой источником тока. Поэтому э. д. с. численно равна энергии, сообщаемой источником тока единичному положительному заряду. Если количеству электричества *Q* кулонов источник тока сообщает энергию *A* *дж*, то э. д. с. источника энергии

$$E = \frac{A}{Q} [в].$$

Так как $A = Pt$ и $Q = It$ (где *P* — мощность, развиваемая источником тока, *вт*, *I* — сила тока, *a*, *t* — время, *сек*), то

$$E = \frac{P}{I},$$

т. е. *электродвижущей силой* может быть названо отношение мощности, развиваемой источником тока, к силе тока.

В наличии э. д. с. можно убедиться путем присоединения к полюсам источника энергии (вместо линейных проводов) прибора, называемого вольтметром. Стрелка вольтметра при этом отклонится на некоторый угол. Отклонение будет тем больше, чем больше э. д. с. источника энергии. Однако вольтметр покажет не величину э. д. с., а, как мы увидим ниже, напряжение на зажимах источника тока, которое так же как и э. д. с. измеряется в вольтах.

Высокие напряжения и э. д. с. выражены в киловольтах (*кв*): 1 *кв* = 1000 *в*.

Малые величины напряжений и э. д. с. выражают в милливольтвах (*мв*); 1 *мв* = 0,001 *в*.

§ 15. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Направленному движению электрических зарядов в любом проводнике препятствуют его молекулы и атомы. Поэтому как внешняя цепь, так и сам источник энергии оказывают препятствие

прохождению тока. Величина, характеризующая противодействие электрической цепи прохождению электрического тока, называется *электрическим сопротивлением* (или, короче, *сопротивлением*).

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

Электрическое сопротивление обозначается буквой r и на схемах изображается так, как показано на рис. 14, а.

Единицей измерения сопротивления является *ом*. *Омом* называется электрическое сопротивление такого линейного проводника, в котором при неизменяющейся разности потенциалов в 1 в протекает ток силой в 1 а, т. е.

$$1 \text{ ом} = \frac{1 \text{ в}}{1 \text{ а}}$$

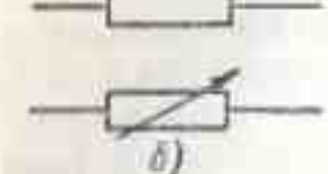


Рис. 14. Условные обозначения:
а — сопротивление,
б — реостат

При измерении больших сопротивлений используют единицы в тысячу и в миллион раз больше ома. Они называются *килоомом* (ком) и *мегаомом* (Мом); 1 ком = 1000 ом; 1 Мом = 1 000 000 ом.

В различных веществах содержится различное количество электронов, а атомы, между которыми эти электроны движутся, имеют различное расположение. Поэтому сопротивление проводников электрическому току зависит от материала, из которого они изготовлены, от длины и площади поперечного сечения проводника. Если сравнить два проводника, изготовленных из одного и того же материала, то более длинный проводник имеет большее сопротивление при равных площадях поперечных сечений, а проводник с большим поперечным сечением имеет меньшее сопротивление при равных длинах.

Для оценки электрических свойств материала проводника служит *удельное сопротивление* — это сопротивление проводника длиной в 1 м и площадью поперечного сечения в 1 мм². Удельное сопротивление обозначается буквой ρ .

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

$$r = \rho \frac{l}{q} \text{ [ом]} \quad (18)$$

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

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

ления, который выражает прирост сопротивления проводника при изменении температуры на 1°С, отнесенный к 1 ом начального сопротивления.

Таким образом, температурный коэффициент сопротивления

$$\alpha = \frac{r_2 - r_1}{r_1 (T_2 - T_1)} \left[\frac{1}{^\circ\text{C}} \right], \quad (19)$$

где r_1 — сопротивление проводника при температуре T_1 ,

r_2 — сопротивление того же проводника при температуре T_2 .

Поясним выражение для температурного коэффициента сопротивления на примере. Положим, что медный линейный провод при температуре $T_1 = 15^\circ\text{C}$ имеет сопротивление $r_1 = 75 \text{ ом}$, а при температуре $T_2 = 75^\circ\text{C}$ $r_2 = 93 \text{ ом}$. Следовательно, прирост сопротивления при изменении температуры на $75 - 15 = 60^\circ\text{C}$ составляет $93 - 75 = 18 \text{ ом}$. Таким образом, прирост сопротивления, соответствующий изменению температуры на 1°С, равен $\frac{18}{60} = 0,3$.

Для определения температурного коэффициента сопротивлений нужно этот прирост сопротивления отнести к 1 ом начального сопротивления, т. е. разделить на 75:

$$\alpha = \frac{0,3}{75} = 0,004 \text{ } 1/^\circ\text{C}.$$

Соотношение между сопротивлениями r_2 и r_1 :

$$r_2 = r_1 [1 + \alpha (T_2 - T_1)]. \quad (20)$$

Следует иметь в виду, что это соотношение справедливо при не очень высоких температурах, а для измерения сопротивлений при температурах выше 100—150°С оно не может быть использовано.

Регулируемые сопротивления называются *реостатами*. Реостаты изготавливают из проволоки с большим удельным сопротивлением, например из нихрома. Сопротивление реостатов может изменяться равномерно или ступенями. Применяют также жидкостные реостаты, представляющие собой металлический сосуд, наполненный каким-либо раствором, проводящим электрический ток, например раствором соли в воде. На схемах реостаты условно обозначают так, как показано на рис. 14, б.

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

Таким образом, соотношение между сопротивлением и проводимостью проводника следующее:

$$g = \frac{1}{r} \text{ и } r = \frac{1}{g}.$$

Величина, обратная удельному сопротивлению материала проводника, называется *удельной проводимостью* и обозначается

Таким образом, через прибор проходит весь измеряемый ток; такое включение называется *последовательным*. Вольтметр подключают к началу и к концу участка цепи, такое включение вольтметра называется *параллельным*. Вольтметр показывает падение напряжения на данном участке. Если вольтметр подключить к началу

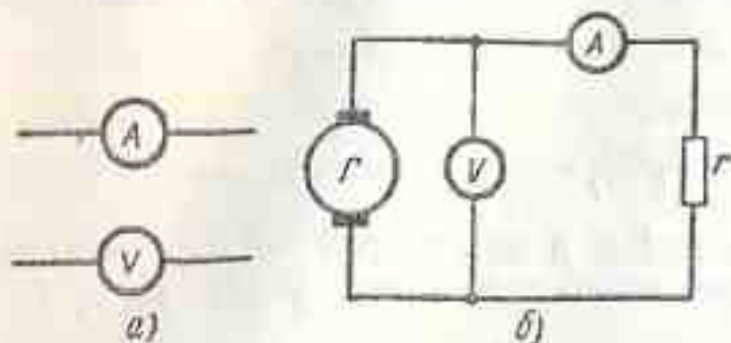


Рис. 15. Условное обозначение (а) и схема включения (б) амперметра и вольтметра

э. д. с. и падением напряжения на внутреннем сопротивлении этого источника, т. е.

$$U = E - Ir_0. \quad (25)$$

Если уменьшать сопротивление внешней цепи r , то сопротивление всей цепи $r+r_0$ также уменьшится, а сила тока в цепи увеличится. С увеличением силы тока падение напряжения внутри источника энергии (Ir_0) возрастет, так как внутреннее сопротивление r_0 источника энергии остается неизменным. Следовательно, с уменьшением сопротивления внешней цепи напряжение на зажимах источника энергии также уменьшается. Если зажимы источника энергии соединить проводником с сопротивлением, практически равным нулю, то ток в цепи $I = \frac{E}{r_0}$.

Это выражение определяет наибольший ток, который может быть получен в цепи данного источника.

Если сопротивление внешней цепи практически равно нулю, то такой режим называется *коротким замыканием*.

Для источников энергии с малым внутренним сопротивлением, например для электрических генераторов (электромашин) и кислотных аккумуляторов, короткое замыкание весьма опасно — оно может вывести из строя эти источники.

Короткое замыкание возникает довольно часто, например из-за нарушения изоляции проводов, соединяющих приемник с источником энергии. Лишенные изолирующего покрова металлические (обычно медные) линейные провода при взаимном соприкосновении образуют весьма малое сопротивление, которое по сравнению с сопротивлением приемника может быть принято равным нулю.

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

внешней цепи — положительному полюсу источника энергии и к концу внешней цепи — к отрицательному полюсу источника энергии, то он покажет падение напряжения во всей внешней цепи, которое будет в то же время напряжением на зажимах источника энергии.

Напряжение на зажимах источника энергии (генератора) равно разности между

Пример 1. Аккумуляторная батарея с э. д. с. 42 в и внутренним сопротивлением 0,2 ом замкнута на приемник энергии, имеющий сопротивление 4 ом. Определить силу тока в цепи и напряжение на зажимах батареи.

Решение.

$$I = \frac{E}{r_0 + r} = \frac{42}{4,2} = 10 \text{ а.}$$

$$U = Ir = 10 \cdot 4 = 40 \text{ в или } U = E - Ir_0 = 42 - 10 \cdot 0,2 = 40 \text{ в.}$$

Пример 2. Кислотный аккумулятор имеет э. д. с. 2 в и внутреннее сопротивление $r_0 = 0,05$ ом. При подключении к аккумулятору внешнего сопротивления протекает ток силой 4 а. Определить сопротивление внешней цепи.

Решение.

$$I = \frac{E}{r_0 + r},$$

откуда

$$r = \frac{E}{I} - r_0 = \frac{2}{4} - 0,05 = 0,45 \text{ ом.}$$

Пример 3. Генератор постоянного тока имеет внутреннее сопротивление 0,3 ом. Определить э. д. с. генератора, если при включении его на приемник энергии с сопротивлением 27,5 ом на зажимах генератора устанавливается напряжение 110 в.

Решение.

Силу тока, протекающую в замкнутой цепи, можно найти из следующего выражения:

$$I = \frac{U}{r} = \frac{110}{27,5} = 4 \text{ а.}$$

Э. д. с. генератора равна:

$$E = U + Ir_0 = 110 + 4 \cdot 0,3 = 111,2 \text{ в.}$$

Пример 4. Батарея кислотных аккумуляторов с э. д. с. 220 в и внутренним сопротивлением 0,5 ом оказалась замкнутой накоротко. Определить ток в цепи.

Решение.

$$I = \frac{E}{r_0} = \frac{220}{0,5} = 440 \text{ а.}$$

Так как для приведенного в примере типа аккумуляторной батареи при нормальном (десятичасовом) разряде ток равен 3,6 а, то ток в 440 а является безусловно опасным для целостности батарей.

§ 17. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

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

Предположим, что внешняя цепь генератора (рис. 16) состоит из трех приемников энергии с сопротивлениями, соответственно равными r_1, r_2, r_3 . Такое соединение приемников, при котором каждый из них поочередно включен в одну замкнутую электрическую цепь, называется *последовательным*. Очевидно, что ток при этом во всех приемниках одинаков, а сопротивление внешней цепи равно сумме сопротивлений проводников. Сопротивле-

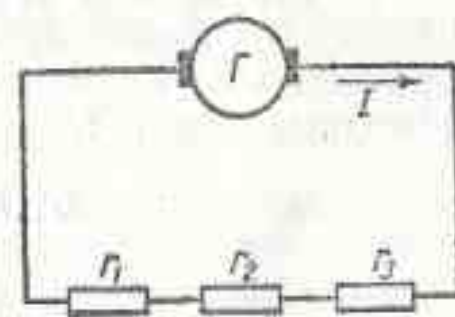


Рис. 16. Последовательное соединение сопротивлений

ние прямо пропорционально длине проводника и включение нескольких проводников увеличивает длину пути тока, т. е. увеличивается сопротивление.

Для нашего случая формула закона Ома имеет следующий вид:

$$I = \frac{E}{r_0 + r_1 + r_2 + r_3}$$

Таким образом, при наличии трех последовательно соединенных проводников общее сопротивление цепи

$$r = r_0 + r_1 + r_2 + r_3,$$

а сопротивление внешней цепи

$$r' = r_1 + r_2 + r_3.$$

Напряжение на зажимах источника энергии равно напряжению, приложенному к внешней цепи, т. е.

$$U = E - Ir_0 = I(r_1 + r_2 + r_3),$$

где Ir_0 — падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника энергии.

Напряжение на зажимах последовательно соединенных приемников энергии равно произведению силы тока на сопротивление приемника, т. е.

$$U_1 = Ir_1; U_2 = Ir_2; U_3 = Ir_3;$$

$$U_1 + U_2 + U_3 = I(r_1 + r_2 + r_3) = U.$$

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

Пример. Три приемника с сопротивлениями $r_1 = 8$ ом, $r_2 = 10$ ом и $r_3 = 12$ ом соединены последовательно и включены в сеть постоянного тока с напряжением $U = 120$ в. Сила тока в такой цепи

$$I = \frac{U}{r_1 + r_2 + r_3} = \frac{120}{8 + 10 + 12} = 4 \text{ а.}$$

Напряжения на зажимах приемников энергии равны:

$$U_1 = Ir_1 = 4 \cdot 8 = 32 \text{ в; } U_2 = Ir_2 = 4 \cdot 10 = 40 \text{ в;}$$

$$U_3 = Ir_3 = 4 \cdot 12 = 48 \text{ в; } U_1 + U_2 + U_3 = 32 + 40 + 48 = 120 \text{ в.}$$

Так как на всех участках цепи, состоящей из последовательно соединенных приемников, сила тока одинакова, то напряжения пропорциональны их сопротивлениям или обратно пропорциональны проводимостям, т. е.

$$U_1 : U_2 : U_3 = r_1 : r_2 : r_3 = \frac{1}{g_1} : \frac{1}{g_2} : \frac{1}{g_3}.$$

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

Если в вышеприведенном примере изменить сопротивление одного из приемников, например, первого до $r_1 = 18$ ом (вместо 8 ом), то сила тока в цепи

$$I = \frac{U}{r_1 + r_2 + r_3} = \frac{120}{18 + 10 + 12} = 3 \text{ а}$$

и напряжения на зажимах приемников

$$U_1 = Ir_1 = 3 \cdot 18 = 54 \text{ в; } U_2 = Ir_2 = 3 \cdot 10 = 30 \text{ в;}$$

$$U_3 = Ir_3 = 3 \cdot 12 = 36 \text{ в.}$$

Увеличение сопротивления внешней цепи ведет к уменьшению силы тока и, следовательно, уменьшает падение напряжения на всех участках внешней цепи. Положим, что приемник с сопротивлением $r = 6$ ом подключен к источнику электрической энергии с напряжением $U = 24$ в. В этом случае сила тока в приемнике

$$I = \frac{U}{r} = \frac{24}{6} = 4 \text{ а.}$$

Если последовательно с этим проводником включить второй с сопротивлением $r' = 2$ ом, то сила тока в цепи будет:

$$I' = \frac{U}{r + r'} = \frac{24}{6 + 2} = 3 \text{ а}$$

и напряжение на первом приемнике

$$U' = I'r = 3 \times 6 = 18 \text{ в.}$$

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

Пример 1. К зажимам генератора постоянного тока с внутренним сопротивлением 0,5 ом подключены последовательно соединенные приемники энергии, обладающие сопротивлениями 3; 2 и 1,5 ом. Определить сопротивление всей цепи и внешнее сопротивление.

Решение.

Сопротивление всей цепи

$$r = r_0 + r_{\text{вн}} = 0,5 + 3 + 2 + 1,5 = 7 \text{ ом.}$$

Сопротивление внешней цепи

$$r_{\text{вн}} = 3 + 2 + 1,5 = 6,5 \text{ ом.}$$

Пример 2. Вольтметр с внутренним сопротивлением $r_0 = 2000$ ом предназначен для измерения напряжения до 50 в. Определить величину добавочного сопротивления, которое нужно включить последовательно с вольтметром для того, чтобы этим вольтметром можно было измерять напряжение до 200 в.

Решение. При включении в сеть с напряжением 50 в через вольтметр будет протекать ток

$$I = \frac{50}{2000} = 0,025 \text{ а.}$$

Для измерения напряжений до 200 в надо включить последовательно с вольтметром такое добавочное сопротивление, в котором будет погашено избыточное напряжение

$$U = 200 - 50 = 150 \text{ в.}$$

Отсюда добавочное сопротивление

$$r = \frac{U}{I} = \frac{150}{0,025} = 6000 \text{ ом.}$$

Для цепей, состоящих из последовательно соединенных источника и приемника энергии, соотношение между током, э. д. с. и сопротивлением всей цепи или между током, напряжением и сопротивлением на каком-либо участке цепи определяется законом Ома. Однако на практике преимущественно приходится иметь дело с такими цепями, в которых токи от какого-либо пункта могут идти

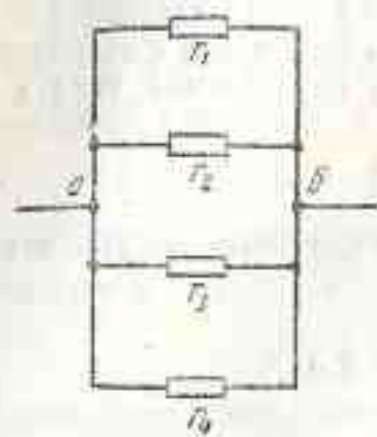


Рис. 17. Разветвленная цепь

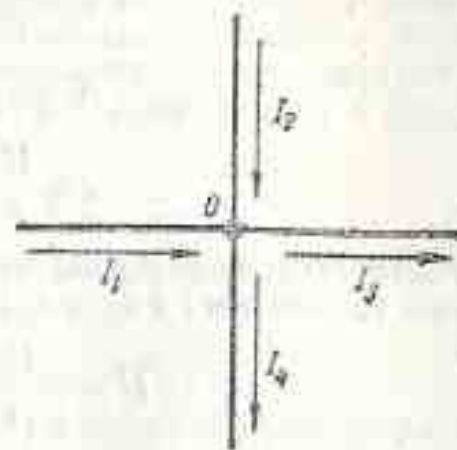


Рис. 18. Узловая точка

по разным путям и в которых, следовательно, есть точки, где сходятся несколько проводников. Эти точки называются узлами (узловыми точками), а участки цепи, соединяющие два соседних узла, — ветвями цепи.

Положим, что в узле *a* (рис. 17) цепь разветвляется на четыре ветви, которые вновь сходятся в узле *b*. Обозначим силу тока в неразветвленной цепи через *I*, а в ветвях соответственно: *I*₁, *I*₂, *I*₃ и *I*₄.

Между этими токами в такой цепи будет следующее соотношение:

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

Если в узле сходятся несколько проводов с различным направлением (рис. 18), то

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

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

Пример. В сеть с напряжением 120 в включены параллельно четыре резистора, сопротивления которых соответственно равны: 20, 40, 60 и 30 ом. Определить силу тока, протекающего в неразветвленной цепи.

Решение. Сила тока в отдельных ветвях равна:

$$I_1 = \frac{U}{r_1} = \frac{120}{20} = 6 \text{ а}; \quad I_2 = \frac{U}{r_2} = \frac{120}{40} = 3 \text{ а};$$

$$I_3 = \frac{U}{r_3} = \frac{120}{60} = 2 \text{ а}; \quad I_4 = \frac{U}{r_4} = \frac{120}{30} = 4 \text{ а}.$$

Сила тока в неразветвленной цепи

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 6 + 3 + 2 + 4 = 15 \text{ а}.$$

§ 19. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Параллельно соединенными называются элементы электрической цепи, находящиеся под одним и тем же напряжением.

При параллельном соединении сопротивлений (см. рис. 17) ток будет проходить по четырем направлениям, что уменьшит общее сопротивление или увеличит общую проводимость цепи, которая равна сумме проводимостей отдельных ветвей.

В этом можно легко убедиться, если представить увеличение числа параллельно соединенных проводников как увеличение площади поперечного сечения проводника, по которому протекает ток. Как известно, общее сопротивление обратно пропорционально, а проводимость прямо пропорциональна площади поперечного сечения проводника. Таким образом, обозначив проводимость всех проводников в совокупности буквой *g*, а проводимость каждого в отдельности проводника *g*₁, *g*₂, *g*₃ и *g*₄, получим следующее равенство:

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

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

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}.$$

В этом выражении *r* представляет собой общее или эквивалентное сопротивление четырех параллельно соединенных проводников, которое меньше любого из четырех заданных.

Докажем полученное соотношение. Обозначив силу тока в неразветвленной ветви буквой *I*, силу тока в отдельных ветвях соответственно *I*₁, *I*₂, *I*₃ и *I*₄, напряжение между точками *a* и *b* — *U* и общее сопротивление между этими точками *r*, на основании закона Ома напишем следующие равенства:

$$I = \frac{U}{r}; \quad I_1 = \frac{U}{r_1}; \quad I_2 = \frac{U}{r_2}; \quad I_3 = \frac{U}{r_3}; \quad I_4 = \frac{U}{r_4}.$$

Согласно первому закону Кирхгофа

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

или

$$\frac{U}{r} = \frac{U}{r_1} + \frac{U}{r_2} + \frac{U}{r_3} + \frac{U}{r_4}.$$

Сократив обе части полученного выражения на U , окончательно получим:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}$$

что и требовалось доказать.

Установленное соотношение справедливо для любого числа параллельно соединенных приемников. В частном случае, если в электрической цепи содержится два параллельно соединенных приемника с сопротивлениями r_1 и r_2 , то можно написать следующее равенство:

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

Из этого равенства найдем сопротивление r , которым можно заменить два параллельно соединенных сопротивления:

$$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}$$

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

Если параллельно соединено какое-либо число n приемников с одинаковыми сопротивлениями r , то общее сопротивление такой цепи будет в n раз меньше сопротивления одного проводника, т. е.

$$r_{\text{общ}} = \frac{r}{n}$$

Возвращаясь к рис. 17, напишем следующие соотношения:

$$I_1 r_1 = U; I_2 r_2 = U; I_3 r_3 = U; I_4 r_4 = U.$$

Так как правые части этих равенств равны между собой, то левые также равны:

$$I_1 r_1 = I_2 r_2 = I_3 r_3 = I_4 r_4.$$

Из этих равенств получим следующие соотношения:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2}{r_1}; \frac{I_2}{I_3} = \frac{r_3}{r_2}; \frac{I_3}{I_4} = \frac{r_4}{r_3}; \frac{I_4}{I_1} = \frac{r_1}{r_4}$$

Эти соотношения указывают на то, что в цепях с параллельно включенными сопротивлениями токи распределяются обратно пропорционально этим сопротивлениям. Таким образом, чем больше величина включенного параллельно сопротивления, тем меньше сила тока в этом сопротивлении и наоборот. Сопротивление является величиной обратной проводимости, следовательно, в цепях с параллельно соединенными проводниками токи распределяются прямо пропорционально проводимости этих проводников.

Если напряжение между узлами не изменяется, то токи в приемниках энергии, включенных между этими узлами, в отличие от последовательного включения их, независимы один от другого. Выключение одного или нескольких приемников из цепи не отражается

на работе остальных, оставшихся включенными. Поэтому осветительные лампы, электродвигатели и другие приемники электрической энергии преимущественно включают параллельно.

На участке электрической цепи параллельное включение ведет к изменению тока как во всей цепи, так и в рассматриваемом участке.

Так, например, при последовательном включении сопротивлений $r_1 = 10$ ом и $r_2 = 30$ ом в сеть с напряжением $U = 120$ в сила тока в цепи

$$I = \frac{U}{r_1 + r_2} = \frac{120}{10 + 30} = 3 \text{ а.}$$

Если включить параллельно сопротивлению r_2 сопротивление $r_3 = 60$ ом, то изменится сила тока как в неразветвленной цепи, так и в сопротивлении r_2 . Сопротивление двух параллельных ветвей равно:

$$r_{23} = \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3} = \frac{30 \cdot 60}{30 + 60} = 20 \text{ ом.}$$

Ток в неразветвленной цепи станет равным:

$$I' = \frac{U}{r_1 + r_{23}} = \frac{120}{10 + 20} = 4 \text{ а.}$$

Ток в сопротивлении r_2 станет равным:

$$I_2 = \frac{U - I' r_1}{r_2} = \frac{120 - 4 \cdot 10}{30} = 2,67 \text{ а.}$$

Параллельное включение сопротивления на участке электрической цепи на практике используется для уменьшения силы тока в данном участке. В частности, такое параллельно включаемое сопротивление, называемое *шунтом*, применяют для расширения пределов измерения токов амперметрами. При наличии шунта в прибор отводится лишь часть измеряемого тока. Шунт включают последовательно в цепь и параллельно шунту подключают амперметр.

Пример 1. Параллельно включено четыре приемника энергии с сопротивлениями, соответственно равными 10; 15; 25 и 30 ом. Требуется определить: 1) общее сопротивление четырех приемников энергии; 2) силу тока в параллельных ветвях и в неразветвленной цепи, если приемники энергии включены на зажимах генератора, э. д. с. которого 170 в и внутреннее сопротивление 0,55 ом.

Решение.

Сопротивление четырех параллельных ветвей равно:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} = \frac{1}{10} + \frac{1}{15} + \frac{1}{25} + \frac{1}{30} = \frac{12}{50} \text{ ом}^{-1}$$

откуда $r = 4,15$ ом.

Сопротивление замкнутой цепи

$$r_0 + r = 0,55 + 4,15 = 4,7 \text{ ом.}$$

Сила тока в неразветвленной цепи

$$I = \frac{E}{r_0 + r} = \frac{170}{4,7} = 36 \text{ а.}$$

Напряжение на зажимах генератора

$$U = E - I r_0 = 170 - 36 \cdot 0,55 = 150 \text{ в.}$$

Сила тока в отдельных ветвях

$$I_1 = \frac{U}{r_1} = \frac{150}{10} = 15 \text{ а}; I_2 = \frac{U}{r_2} = \frac{150}{15} = 10 \text{ а};$$

$$I_3 = \frac{U}{r_3} = \frac{150}{25} = 6 \text{ а}; I_4 = \frac{U}{r_4} = \frac{150}{30} = 5 \text{ а}.$$

На основании закона Кирхгофа имеем следующее равенство:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 15 + 10 + 6 + 5 = 36 \text{ а}.$$

Пример 2. Амперметр с внутренним сопротивлением $r = 0,12 \text{ ом}$ предназначен для измерения силы тока до $I = 5 \text{ а}$. Определить сопротивление r_1 , которое необходимо включить параллельно амперметру для того, чтобы им можно было измерять силу тока до $I_1 = 35 \text{ а}$.

Решение. Поскольку амперметр предназначен для измерения силы тока до 5 а , то сила тока через шунт

$$I' = I_1 - I = 35 - 5 = 30 \text{ а}.$$

Имея в виду, что при параллельном соединении амперметра и шунта токи, протекающие через прибор и шунт, распределяются обратно пропорционально их сопротивлениям, можем записать следующее равенство:

$$\frac{I}{I'} = \frac{r_1}{r},$$

откуда сопротивление шунта

$$r_1 = r \frac{I}{I'} = 0,12 \frac{5}{30} = 0,02 \text{ ом}.$$

§ 20. СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Если в электрической цепи приемники, соединенные параллельно между собой, включены последовательно с другими приемниками, то такое соединение их называется *смешанным*. Для определения общего, или эквивалентного, сопротивления нескольких приемников, соединенных смешанно, сначала находят сопротивление параллельно или последовательно соединенных проводников, а затем заменяют их одним проводником с сопротивлением, равным найденному. Например, для определения сопротивления между точками a и b (рис. 19) сначала находят сопротивление между точками b и z :

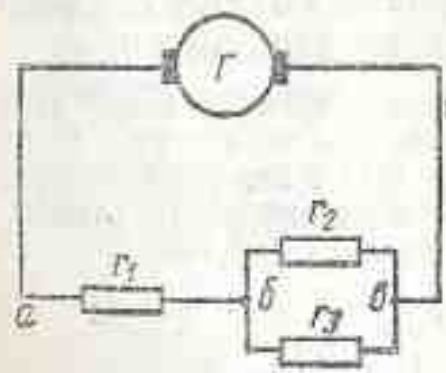


Рис. 19. Смешанное соединение сопротивлений

$$r' = \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3},$$

а затем складывают полученное значение сопротивления с сопротивлением r_1 :

$$r = r_1 + \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3}.$$

Пример. Э. д. с. генератора 120 в , внутреннее его сопротивление $r_0 = 1 \text{ ом}$ (рис. 19). Значения сопротивлений таковы: $r_1 = 5 \text{ ом}$; $r_2 = 10 \text{ ом}$; $r_3 = 15 \text{ ом}$. Определить общее сопротивление внешней цепи и токи в каждом сопротивлении.

Решение.

Сопротивление между точками b и z

$$r_{bz} = \frac{r_2 r_3}{r_2 + r_3} = \frac{10 \cdot 15}{10 + 15} = 6 \text{ ом}.$$

Сопротивление внешней цепи

$$r = r_1 + r_{bz} = 5 + 6 = 11 \text{ ом}.$$

Ток в цепи и в сопротивлении r_1

$$I = \frac{E}{r_0 + r} = \frac{120}{1 + 11} = 10 \text{ а}.$$

Напряжение между точками b и z

$$U_{bz} = E - I(r_1 + r_0) = 120 - 10(5 + 1) = 60 \text{ в}.$$

Ток в сопротивлении r_2

$$I_2 = \frac{U_{bz}}{r_2} = \frac{60}{10} = 6 \text{ а}.$$

Ток в сопротивлении r_3

$$I_3 = \frac{U_{bz}}{r_3} = \frac{60}{15} = 4 \text{ а}.$$

§ 21. ВТОРОЙ ЗАКОН КИРХГОФА

Второй закон Кирхгофа может быть сформулирован следующим образом: *во всякой замкнутой электрической цепи алгебраическая сумма всех э. д. с. равна алгебраической сумме падений напряжения в сопротивлениях, включенных последовательно в эту цепь, т. е.*

$$E_1 + E_2 + E_3 + \dots \text{ и т. д.} = I_1 r_1 + I_2 r_2 + I_3 r_3 \text{ и т. д.}$$

Если в электрической цепи включены два источника энергии, э. д. с. которых совпадают по направлению, т. е. согласно (рис. 20, а), то э. д. с. всей цепи равна сумме э. д. с. этих источников, т. е.

$$E = E_1 + E_2.$$

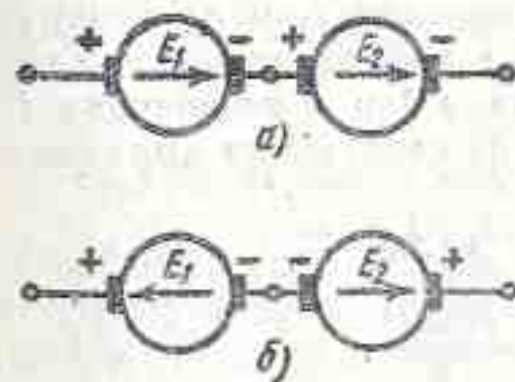


Рис. 20. Соединение источников электрической энергии:
а — согласное, б — встречное

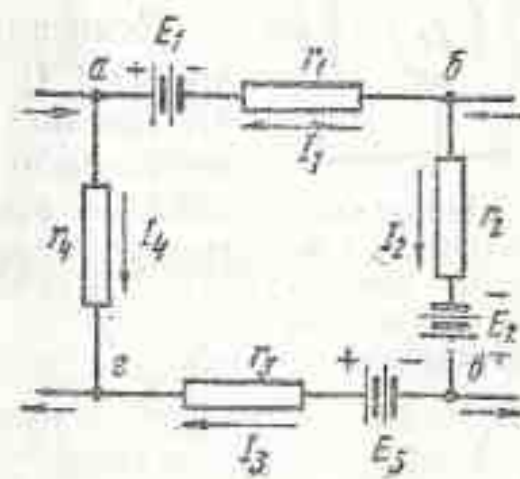


Рис. 21. Замкнутая электрическая цепь

Если же в цепь включено два источника, э. д. с. которых имеют противоположные направления, т. е. включены встречно (рис. 20, б), то общая э. д. с. цепи равна разности э. д. с. этих источников,

$$E = E_1 - E_2.$$

При последовательном включении в электрическую цепь нескольких источников энергии с различным направлением э. д. с. общая э. д. с. равна алгебраической сумме э. д. с. всех источников. Суммирование э. д. с. одного направления берут со знаком плюс, а э. д. с. противоположного направления — со знаком минус. При составлении уравнений выбирают направление обхода цепи и произвольно задаются направлениями токов.

Обычно замкнутая цепь является частью сложной цепи, как показано, например, на рис. 21. Замкнутая цепь обозначена буквами $a, b, в$ и $г$. Ввиду наличия ответвлений в точках $a, б, в, г$ токи I_1, I_2, I_3 и I_4 , отличаясь по силе, могут иметь и различные направления. Для такой цепи в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно написать:

$$E_1 - E_2 - E_3 = I_1(r_{01} + r_1) - I_2(r_{02} + r_2) - I_3(r_{03} + r_3) + I_4 r_4,$$

где r_{01}, r_{02}, r_{03} — внутренние сопротивления источников энергии, r_1, r_2, r_3, r_4 — сопротивления приемников энергии.

В частном случае при отсутствии ответвлений и последовательном соединении проводников общее сопротивление равно сумме всех сопротивлений.

Если внешняя цепь источника энергии с внутренним сопротивлением r_0 состоит, например, из трех последовательно соединенных резисторов с сопротивлениями, соответственно равными r_1, r_2, r_3 , то на основании второго закона Кирхгофа можно написать следующее равенство:

$$E = I r_0 + I r_1 + I r_2 + I r_3 \dots$$

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

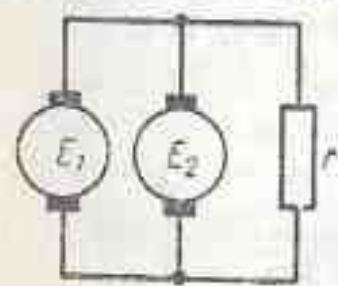


Рис. 22. Параллельно соединенные генераторы, замкнутые на внешнее сопротивление

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

Если два параллельно соединенных источника энергии (рис. 22), имеющих э. д. с. E_1 и E_2 и внутренние сопротивления r_1 и r_2 , замкнуть на какое-либо внешнее сопротивление r , то силу тока во внешней цепи I и в источниках I_1 и I_2 можно определить из следующих выражений:

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

$$I_1 = \frac{E_1 - U}{r_1}; I_2 = \frac{E_2 - U}{r_2}.$$

Отсюда сила тока во внешней цепи

$$I = \frac{E_1 r_2 + E_2 r_1}{r_1 r_2 + r r_1 + r r_2}.$$

Сила тока, протекающего через первый и второй источники энергии,

$$I_1 = \frac{E_1 - I r}{r_1} \text{ и } I_2 = \frac{E_2 - I r}{r_2}.$$

Пример 1. В схеме, изображенной на рис. 21, э. д. с. источников энергии и сопротивления приемников энергии имеют следующие значения: $E_1 = 6$ в, $E_2 = 12$ в, $E_3 = 9$ в, $r_1 = 8$ ом, $r_2 = 5$ ом, $r_3 = 4$ ом и $r_4 = 10$ ом. Определить силу тока в замкнутой цепи и напряжение между точками a и $г$, если внутренние сопротивления всех источников энергии одинаковы и равны $r_0 = 1$ ом.

Решение. Алгебраическая сумма э. д. с. в цепи

$$-E_1 + E_2 + E_3 = -6 + 12 + 9 = 15 \text{ в.}$$

В этом выражении э. д. с. E_1 взята со знаком минус потому, что первый источник энергии включен встречно второму и третьему.

Общее сопротивление цепи

$$3r_0 + r_1 + r_2 + r_3 + r_4 = 3 + 8 + 5 + 4 + 10 = 30 \text{ ом.}$$

Сила тока в цепи

$$I = \frac{E_1 - E_2 + E_3}{3r_0 + r_1 + r_2 + r_3 + r_4} = \frac{15}{30} = 0,5 \text{ а.}$$

Напряжение между точками a и $г$

$$U_{ar} = I r_4 = 0,5 \cdot 10 = 5 \text{ в.}$$

Пример 2. Два параллельно соединенных генератора (см. рис. 22), имеющие э. д. с. $E_1 = E_2 = 120$ в и внутренние сопротивления $r_1 = 3$ ом и $r_2 = 6$ ом, замкнуты на сопротивление $r = 18$ ом.

Определить силу тока во внешней цепи и токи в первом и во втором генераторах.

Решение. Внутреннее сопротивление двух параллельно соединенных генераторов,

$$r_0 = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} = \frac{3 \cdot 6}{3 + 6} = 2 \text{ ом.}$$

Сила тока во внешней цепи

$$I = \frac{E}{r_0 + r} = \frac{120}{2 + 18} = 6 \text{ а.}$$

Токи в первом и во втором генераторах обратно пропорциональны внутренним сопротивлениям этих генераторов, т. е.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2}{r_1} = \frac{6}{3} = 2.$$

Таким образом, $I_1 + I_2 = 3I_2 = 6$ а, откуда $I_2 = 2$ а и $I_1 = 2I_2 = 4$ а.

§ 22. РАБОТА И МОЩНОСТЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Способность тела производить работу называется *энергией этого тела*. Например, поднятый на высоту какой-либо груз обладает некоторым запасом энергии и при падении производит работу. Энергия тела тем больше, чем большую работу может произвести это тело при своем движении. Энергия не исчезает, а переходит из одной формы в другую. Например, электрическая энергия может быть превращена в механическую, тепловую, химическую, механическая — в электрическую и т. д.

Для переноса зарядов в замкнутой цепи источник электрической энергии затрачивает известную энергию, равную произведе-

нию э. д. с. источника на количество электричества, перенесенного через эту цепь, т. е. EQ .

Однако не вся эта энергия является полезной, т. е. не вся работа, произведенная источником энергии, сообщается приемнику энергии, так как часть ее расходуется на преодоление внутреннего сопротивления источника и проводов. Таким образом, источник энергии производит полезную работу, равную

$$A = UQ,$$

где U — напряжение на зажимах приемника.

Так как количество электричества равно произведению силы тока в цепи на время его прохождения:

$$Q = It,$$

формулу работы можно представить в следующем виде:

$$A = UIt, \quad (26)$$

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

Если же выразить напряжение на зажимах участка цепи как произведение силы тока на сопротивление этого участка, т. е.

$$U = Ir,$$

то формулу работы можно записать и таким образом:

$$A = I^2rt. \quad (27)$$

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

Мощностью называется работа, производимая (или потребляемая) в одну секунду. Мощность выражается следующими формулами:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{UQ}{t} = UI = I^2r.$$

Если в формулах работы и мощности напряжение выражено в вольтах, сила тока — в амперах, сопротивление — в омах и время — в секундах, то работа выражается в ньютон-метрах или в ватт-секундах ($вт \cdot с$), т. е. в джоулях ($дж$), а мощность — в ваттах ($вт$). Для измерения малых мощностей применяют единицу, в тысячу раз меньшую одного ватта, называемую милливаттом ($мвт$); $1 вт = 1000 мвт$. Для выражения больших мощностей применяют единицу, в тысячу раз большую ватта, называемую киловаттом ($квт$); $1 квт = 1000 вт$.

Так как джоуль является малой единицей, то работа обычно выражается в более крупных единицах: ватт-часах ($вт \cdot ч$), гектоватт-часах ($гвт \cdot ч$) и киловатт-часах ($квт \cdot ч$). Соотношение между этими единицами и джоулем следующее: $1 вт \cdot ч = 3600 дж$; $1 гвт \cdot ч = 100 вт \cdot ч$; $1 квт \cdot ч = 1000 вт \cdot ч$.

Из формулы $P = UI$ следует, что при очень малом внешнем сопротивлении r сила тока в цепи велика, а напряжение на зажимах генератора при этом мало. При сопротивлении внешней цепи r , равном нулю, напряжение на зажимах генератора U также равно нулю. Следовательно, и мощность P , отдаваемая во внешнюю цепь, равна нулю.

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

Таким образом, с увеличением сопротивления внешней цепи мощность сначала возрастает от нуля до какой-то наибольшей (максимальной) величины, а затем убывает до нуля.

Определим сопротивление внешней цепи r , при котором источник энергии отдает в нагрузку наибольшую мощность:

$$P = UI = EI - I^2r_0, \text{ так как } U = E - Ir_0, \text{ где } E \text{ — э. д. с.}$$

источника энергии, r_0 — его внутреннее сопротивление, U — напряжение на его зажимах при нагрузке.

Разделив обе части выражения мощности на r_0 , получим:

$$\frac{P}{r_0} = \frac{EI}{r_0} - I^2.$$

Вычтем из правой части этого равенства $\frac{E^2}{4r_0^2}$ и прибавим к ней эту величину:

$$\frac{P}{r_0} - \frac{EI}{r_0} + I^2 + \frac{E^2}{4r_0^2} - \frac{E^2}{4r_0^2} = \frac{E^2}{4r_0^2} - \left(I^2 - \frac{EI}{r_0} + \frac{E^2}{4r_0^2} \right) = \frac{E^2}{4r_0^2} - \left(I - \frac{E}{2r_0} \right)^2.$$

Очевидно, что наибольшей величина $\frac{P}{r_0}$ (или мощность P , так как r_0 постоянно) будет в том случае, когда вычитаемое правой части этого равенства равно нулю, т. е.

$$I - \frac{E}{2r_0} = 0, \text{ откуда } I = \frac{E}{2r_0}.$$

Если полученное выражение сравнить с формулой $I = \frac{E}{r_0 + r}$, то окажется, что для получения наибольшей мощности во внешней цепи необходимо, чтобы $2r_0 = r_0 + r$ или $r = r_0$.

Таким образом, для получения наибольшей мощности во внешней цепи сопротивление последней должно быть равно внутреннему сопротивлению генератора.

Однако надо иметь в виду, что при равенстве внутреннего сопротивления генератора сопротивлению внешней цепи полезное

действие генератора чрезвычайно невелико и работа его в таких условиях неэкономична, так как половина всей мощности, развиваемой генератором, используется на преодоление его внутреннего сопротивления.

Пример. Имеется батарея гальванических элементов с э. д. с. 10 в и внутренним сопротивлением 10 ом. Определить максимальную мощность, которую эта батарея может отдать во внешнюю цепь.

Решение. Источник энергии отдает во внешнюю цепь максимальную мощность в случае, когда сопротивление внешней цепи равно внутреннему сопротивлению источника энергии, т. е.

$$r = r_0 = 10 \text{ ом.}$$

При таком внешнем сопротивлении ток в цепи

$$I = \frac{E}{r_0 + r} = \frac{10}{20} = 0,5 \text{ а.}$$

Мощность, отдаваемая источником энергии,

$$P = I^2 r = 0,5^2 \cdot 10 = 2,5 \text{ вт.}$$

§ 23. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ИЛИ ОТДАЧА

Мощность, отдаваемая источником энергии во внешнюю цепь, является полезной мощностью P_2 , а мощность, получаемая им извне (от источника энергии механической, химической и т. д.), — потребляемой P_1 . Приемник электрической энергии, потребляя энергию из сети источника электрической энергии, преобразует ее в энергию другого вида — механическую, тепловую и т. д.

В соответствии с законом сохранения энергии полезная мощность источника или приемника электрической энергии P_2 меньше мощности P_1 , потребляемой им, так как в процессе работы источника или приемника в нем неизбежно происходит потеря части преобразуемой им энергии. В преобразователях энергии потеря энергии происходит за счет нагревания проводов их обмоток протекающими в них токами, за счет перемагничивания стали, от вихревых токов и т. д.

Для оценки свойств преобразователя энергии (источника или приемника электрической энергии) служит коэффициент полезного действия (к. п. д. или отдача), равный отношению полезной мощности источника или приемника энергии P_2 к мощности, потребляемой им P_1 , т. е.

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

где ΔP — мощность, расходуемая на преодоление потерь в источнике или приемнике энергии.

Это выражение показывает, что к. п. д. источника или приемника электрической энергии тем выше, чем меньше потери энергии в нем.

Мощность, отдаваемая источником электрической энергии во внешнюю цепь (полезная мощность), равна произведению напряжения на его зажимах на силу тока в цепи, т. е. $P_2 = UI$ и к. п. д. источника энергии

$$\eta = \frac{UI}{P_1} = \frac{UI}{UI + \Delta P}.$$

Мощность, потребляемая приемником электрической энергии, может быть представлена произведением напряжения, приложенного к нему, на силу тока или произведением квадрата силы тока на его сопротивление r , т. е. $P_1 = UI = I^2 r$ и к. п. д. приемника электрической энергии

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{I^2 r} = \frac{UI - \Delta P}{UI} = \frac{I^2 r - \Delta P}{I^2 r}.$$

Пример 1. Генератор постоянного тока с э. д. с. $E = 230$ в и внутренним сопротивлением $r_0 = 0,5$ ом замкнут на приемник энергии. Сила тока в цепи — 20 а, к. п. д. генератора $\eta = 0,8$. Определить полезную мощность генератора, мощность, потребляемую им, и мощность, расходуемую на преодоление потерь в генераторе.

Решение. Напряжение на зажимах генератора

$$U = E - I r_0 = 230 - 20 \cdot 0,5 = 220 \text{ в.}$$

Полезная мощность генератора

$$P_2 = UI = 220 \cdot 20 = 4400 \text{ вт} = 4,4 \text{ квт.}$$

Мощность, потребляемая генератором,

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{4,4}{0,8} = 5,5 \text{ квт.}$$

Мощность, расходуемая на преодоление потерь в генераторе,

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 5,5 - 4,4 = 1,1 \text{ квт.}$$

Пример 2. Двигатель постоянного тока при напряжении $U = 220$ в потребляет ток силой $I = 30$ а. Определить к. п. д. и полезную мощность двигателя, если мощность, потребляемая на преодоление потерь в двигателе, $\Delta P = 1320$ вт = 1,32 квт.

Решение. Мощность, потребляемая двигателем,

$$P_1 = UI = 220 \cdot 30 = 6600 \text{ вт} = 6,6 \text{ квт.}$$

К. п. д. двигателя

$$\eta = \frac{UI - \Delta P}{UI} = \frac{6,6 - 1,32}{6,6} = 0,8.$$

Полезная мощность, развиваемая на валу двигателя,

$$P_2 = P_1 - \Delta P = 6,6 - 1,32 = 5,28 \text{ квт.}$$

§ 24. ЗАКОН ЛЕНЦА — ДЖОУЛЯ

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

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

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

Если обозначить количество теплоты, создаваемое током, буквой Q , силу тока, протекающего по проводнику, — I , сопротивление проводника r и время, в течение которого ток протекал по проводнику, t , то закону Ленца — Джоуля можно придать следующее выражение:

$$Q = I^2 r t \text{ [дж]}. \quad (28)$$

$$\text{Так как } I = \frac{U}{r} \text{ и } r = \frac{U}{I}, \text{ то } Q = \frac{U^2}{r} t = UI t. \quad (29)$$

Пример 1. Определить количество теплоты, выделенное в нагревательном приборе в течение 0,5 ч, если он включен в сеть с напряжением 110 в и имеет сопротивление 24 ом.

Решение. Время прохождения в секундах:

$$t = 0,5 \text{ ч} = 30 \text{ мин} = 30 \cdot 60 = 1800 \text{ сек.}$$

Количество теплоты, выделенное в приборе,

$$Q = \frac{U^2}{r} t = \frac{110^2}{24} \cdot 1800 = 907\,500 \text{ дж.}$$

Примеры 2. В электрическом кипятильнике вода, потребляя количество теплоты 400 000 дж, закипает через 15 мин. Определить сопротивление нагревательного элемента этого кипятильника, а также мощность, если кипятильник работает под напряжением 220 в и его к. п. д. равен 80%.

Решение. Так как к. п. д. кипятильника равен 80%, выделенное нагревательным элементом количество теплоты

$$Q = 400\,000 : 0,8 = 500\,000 \text{ дж.}$$

Силу тока, протекающего через кипятильник, найдем из следующей формулы:

$$Q = UI t,$$

откуда

$$I = \frac{Q}{Ut} = \frac{500\,000}{220 \times 15 \times 60} = 2,53 \text{ а.}$$

Сопротивление нагревательного элемента

$$r = \frac{U}{I} = \frac{220}{2,53} = 87 \text{ ом.}$$

Мощность, потребляемая кипятильником,

$$P = UI = 220 \cdot 2,53 = 556,6 \text{ вт.}$$

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

Из всех видов искусственного освещения наибольшее распространение получила электрическая лампа накаливания с металлической нитью, изобретенная А. Н. Лодыгиным в 1873 г. В такой лампе проводник под действием тока нагревается до белого каления и вследствие этого излучает свет.

Основными частями современной лампы накаливания являются нить накала и стеклянный баллон (колба).

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

Нормальные осветительные лампы выпускаются для напряжений 110, 120, 127 и 220 в.

Чтобы накаленная нить не сгорела, т. е. чтобы она не соединялась с кислородом воздуха, из колбы удаляют кислород. Лампы мощностью до 60 вт изготавливают с колбами, из которых выкачан воздух (вакуумные лампы), у более мощных ламп колбы наполняют разреженной смесью инертных газов — аргона и азота или криптоном (газополные лампы). При наличии в колбе инертного газа уменьшается испарение вольфрама с поверхности нити, что позволяет повысить температуру накала нити.

Нить накала выполняется из тонкой проволоки, свернутой в спираль с близко расположенными друг к другу витками.

Основными характеристиками лампы накаливания являются номинальное напряжение, мощность, излучаемый световой поток, срок службы и световая отдача, которая представляет собой отношение светового потока к мощности и определяет экономичность лампы.

Время непрерывного горения лампы при ее номинальном напряжении, в течение которого она потеряет 10% от начального светового потока, называется сроком службы лампы. Срок службы ламп 1000 ч. Световой поток, излучаемый лампой, уменьшается потому, что при температуре белого каления происходит постепенное уменьшение площади поперечного сечения нити вследствие испарения металла, который в виде пыли осаждается на стенки колбы. Это приводит к увеличению сопротивления нити накала и уменьшению силы света.

Электрическое нагревание проводников не всегда находит полезное применение. Так, в проводах линий электропередач нагревание связано с бесполезной затратой электрической энергии, а при больших токах может создавать опасность возникновения пожаров.

Во избежание чрезмерного нагрева линейных проводов, а также различных обмоток из изолированной проволоки для электрической

аппаратуры установлены нормы максимальных значений сил токов, пропускаемых по данному проводу или обмотке.

Допустимая сила тока для материала и проводника определяется максимальной плотностью тока. *Плотностью тока* называется сила тока, приходящаяся на 1 мм² площади поперечного сечения провода. Например, если по проводу в 6 мм² протекает ток силой 30 а, то плотность тока в этом проводе равна: $30 : 6 = 5 \text{ а/мм}^2$.

Для защиты аппаратов и приборов от прохождения по ним слишком больших токов применяют предохранительные устройства, которые автоматически прерывают цепь тока, как только величина последнего превзойдет допустимую норму.

Наиболее широко распространены в домашних установках так называемые пробковые предохранители, в которых собственно предохранителем — плавкой вставкой служит свинцовая проволока того или иного диаметра, выбираемого в зависимости от номинальной силы тока данной установки.

§ 26. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ДУГА

Электрическая дуга впервые была открыта В. В. Петровым в 1802 г.

Если к полюсам источника электрической энергии присоединить угольные стержни-электроды и сблизить их, то образуется замкнутая электрическая цепь, по которой начнет протекать ток.

Уголь плохо проводит электрический ток, т. е. обладает большим сопротивлением, поэтому в угольных электродах при прохождении тока выделяется значительное количество тепла.

В месте контакта, т. е. в точке соприкосновения угольных электродов, сопротивление увеличивается. В результате сближенные концы угольных стержней нагреваются до очень высокой температуры и начинают светиться.

Если электроды раздвинуть так, чтобы концы их не соприкасались, то ток в цепи прекратится и между концами электродов появится сильное свечение — возникнет электрическая дуга.

Возникновение электрической дуги объясняется следующим. С повышением температуры угольных стержней увеличивается скорость движения электронов, находящихся в угле. При сильном нагреве скорость движения свободных электронов возрастает настолько, что при раздвижении углей электроны из стержней вылетают в межэлектродное пространство. Наступает так называемая *электронная эмиссия*, т. е. выход свободных электронов из угольного стержня во внешнюю среду. При повышении температуры электродов эмиссия увеличивается.

В воздухе свободные электроны с очень большой скоростью летят от отрицательного электрода (катода) к положительному (аноду). Они обладают большой энергией и, сталкиваясь с нейтральными атомами воздуха, расщепляют их на положительно и отрицательно заряженные частицы — ионы. Этот процесс называется *ионизацией вследствие соударения*.

Если энергия электронов недостаточна для ионизации нейтральных атомов, то в результате соударений электронов с нейтральными атомами последние начинают двигаться быстрее и нагревают воздух между электродами. Температура воздуха между электродами достигает нескольких тысяч градусов, вследствие чего наступает другой процесс ионизации — тепловой.

Интенсивное излучение света нагретыми концами электродов также создает электрически заряженные частицы, т. е. происходит фотоионизация.

В итоге всех процессов воздух между электродами ионизируется и перестает быть электрически нейтральным. Наличие раскаленных газов (например, углерода, выделяемого нагретыми до высокой температуры углями) повышает электропроводность пространства между электродами. Таким образом, между раздвинутыми электродами создается газовый промежуток, хорошо проводящий электрический ток — возникает дуговой разряд.

Светящийся промежуток между электродами, заполненный ионами воздуха, электронами и парами углерода, называется столбом, а светящиеся участки поверхности концов электродов — пятнами.

Свободные электроны, находящиеся в пространстве между электродами, с большой скоростью направляются к положительному электроду, подвергая его бомбардировке и нагревая до высокой температуры. На конце электрода, соединенного с положительным полюсом источника энергии (на аноде), возникает раскаленное добела анодное пятно, в центре которого находится воронкообразное углубление или «кратер».

Конец электрода, соединенного с отрицательным полюсом источника энергии (катод), имеет заостренную форму и на нем возникает небольшое светящееся катодное пятно.

Схема дугового разряда показана на рис. 23. Основным источником света является «кратер». Световое излучение катодного пятна не превышает 10%, а излучение столба — не более 5% от всего светового потока, создаваемого дуговым разрядом.

Помимо ионизации, в междуэлектродном пространстве протекают обратные процессы рекомбинации и нейтрализации. Электроны и положительные ионы соединяются между собой, образуя нейтральные атомы. При этом выделяется энергия, которую затратили электроны для расщепления нейтральных частиц. Выделенная энергия проявляется в виде теплоты и электромагнитных колебаний.

В процессе дугового разряда угольные электроды постепенно сгорают и вследствие химического соединения с воздухом образуют углекислый газ CO₂.

Так как электрод, соединенный с положительным зажимом источника энергии, сгорает быстрее, чем электрод, соединенный



Рис. 23.
Схема дугового разряда:
1 — анод,
2 — кратер,
3 — столб,
4 — анодное пятно,
5 — катод

с отрицательным зажимом, для анода используется угольный стержень с большим диаметром, чем для катода.

В настоящее время дуговой разряд применяют для освещения в прожекторах дальнего действия и в кинопроекторах.

Использование электрической дуги для сварки металлов впервые было предложено в 1882 г. русским ученым Н. И. Бенардосом.

Сущность этого способа сварки состоит в том, что один зажим источника электрической энергии присоединяется к свариваемому предмету, а второй — к угольному электроду, помещенному в рукоятку (которую держит сварщик).

Электрическая дуга может образоваться не только между двумя угольными электродами, но и между стержнями из других проводящих материалов.

Если прикоснуться угольным стержнем, соединенным с источником тока, к тому месту предмета, которое желательно сварить, то между этим стержнем и предметом возникает электрическая дуга. Если погрузить в пламя дуги металлический стержень из так называемого присадочного металла, то он под действием высокой температуры начнет плавиться и отдельными каплями стекать в сварочную ванночку. Расплавленный металл застывает в виде сплошного шва — валика, который скрепляет отдельные части свариваемого предмета.

Этот способ сварки был очень несовершенным и требовал значительных улучшений. Надо было предохранить расплавленный металл шва от соприкосновения с воздухом, так как кислород, входящий в состав воздуха, попадая в шов, делал его хрупким. При створании угольного стержня в шов проникало излишнее количество углерода, который так же, как и кислород, делает металл хрупким. Кроме того, угольный стержень создавал очень высокую температуру, вследствие чего металл перегревался и ослаблялся. Также необходимо было усовершенствовать подачу присадочного металла в пламя дуги, так как сварщику было трудно долгое время удерживать металлический пруток на весу в руке.

В 1888 г. Н. Г. Славяновым был предложен иной, более совершенный способ электросварки. Чтобы избежать науглероживания и перегрева металла, Н. Г. Славянов вместо угольного стержня применил металлический, который, создавая дугу, расплавлялся и жидкий металл служил для заполнения шва. Для защиты расплавленного металла от кислорода воздуха Н. Г. Славянов предложил посыпать место сварки толченым стеклом. Часть толченого стекла расплавляется и покрывает тонким слоем шлака металл шва, предохраняя его от вредного воздействия воздуха.

Н. Г. Славяновым был изобретен электрический плавильник, автоматически регулирующий длину дуги, которая по способу Бенардоса регулировалась вручную. Расстояние между электродами при дуговой сварке составляет 3—10 мм.

В настоящее время электросварка широко применяется при сооружении каркасов промышленных и жилых зданий, гидростанций, судов, трубопроводов, котлов и т. д. Она является основным

способом соединения элементов металлических конструкций и почти совершенно вытеснила клепку. Электрическая дуга используется и для сварки металлов под водой. Для этого на стальной электрод наносят водонепроницаемое защитное покрытие из мела, железного сурика, титановой руды, полевого шпата и жидкого стекла. При образовании дугового разряда плавится конец стального стержня. Наружное покрытие стержня, окруженное холодной водой, плавится медленнее стального стержня, поэтому на конце электрода всегда будет кольцеобразный выступ, являющийся защитным козырьком. Под этим козырьком под действием высокой температуры дуги образуются пары расплавленного металла, газы и пары минеральных веществ, входящих в покрытие, водород и кислород, являющиеся продуктами разложения воды. Эти вещества образуют газовый пузырь, защищающий пространство под козырьком от воды.

Электрическая сварка осуществляется как на постоянном, так и на переменном токе.

Каждое прикосновение угольного или металлического стержня к свариваемому предмету для источника электрической энергии ведет к короткому замыканию. Поэтому для питания сварочных установок применяют специальные источники электрической энергии (генераторы, трансформаторы), которые переносят короткие замыкания, не выходя из строя.

Тепловое действие электрической дуги используют также в электромартенах или дуговых печах, предназначенных для выплавки стали и цветных металлов. Дуговая печь сложена из огнеупорного кирпича и защищена снаружи стальным кожухом. Верхнюю ее часть (свод) снимают и через нее в рабочее пространство печи пропускают угольные или графитовые электроды. Температура между электродами в печи достигает 6000—8000°.

Дуговая печь позволяет очень просто регулировать температуру изменением величины тока. Она экономична, так как исключает потери энергии, неизбежные при передаче тепла металлу от топлива, сгорающего в обособленном помещении.

Такие специальные стали, как инструментальная, нержавеющая, жаростойкая и жаропрочная, выплавляют в настоящее время только в электрических печах.

§ 27. ХИМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

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

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

При растворении солей и кислот в воде или в каком-либо ином растворителе (этиловый спирт, бензин, бензол и др.) часть молекул

распадается на две части, называемые ионами, причем одна часть имеет положительный заряд, другая — отрицательный заряд.

Таким образом, в отличие от металлических проводников, где переносчиками электричества являются электроны, в электролитах ими служат ионы. Ионы могут быть простыми и сложными. Простой ион образован одним атомом вещества. Ионы, состоящие из нескольких атомов, называются сложными.

Распад химических соединений на ионы под действием растворителя называется *электролитической диссоциацией* и выражается обычными химическими уравнениями, в левой части которых помещаются химические символы распадающихся веществ, а в правой — образующиеся из этих веществ ионы. Например, уравнение диссоциации поваренной соли (хлористого натрия) записывается следующим образом:



Для более сложных соединений процесс диссоциации может протекать в несколько стадий.

Если в сосуд с электролитом погружены две металлические пластины, называемые электродами, которые при помощи проводочных проводников присоединены к источнику энергии постоянного тока, то вследствие разности потенциалов между электродами через электролит будет протекать ток. Прохождение тока через электролит сопровождается химическим процессом, называемым электролизом. Находящиеся в электролите ионы, притягиваясь к электродам, двигаются в противоположных направлениях: положительные ионы — к катоду, а отрицательные ионы — к аноду. Подойдя к катоду, положительные ионы получают от него недостающие им электроны и образуют электрически нейтральные атомы. На аноде происходит обратный процесс: отрицательные ионы отдают аноду свои избыточные электроны. Например, при электролизе раствора поваренной соли на катоде отлагаются положительные ионы натрия, а на аноде — отрицательные ионы хлора.

В результате непрерывного перехода электронов с катода на ионы и поступления их на анод поддерживается движение электронов в проводах, соединяющих источник электрической энергии с электродами.

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

Первый закон Фарадея сформулирован так: *количество вещества, выделившегося на электродах при прохождении тока через электролит, прямо пропорционально количеству электричества, прошедшему через электролит.* При прохождении одного кулона электричества из электролита выделяется определенное весовое количество вещества, которое называется *электрохимическим эквивалентом* данного вещества.

В практических расчетах для определения количества электричества удобнее пользоваться не кулонами, а ампер-часами ($a \cdot ч$). Так как один кулон равен ампер-секунде, то между ампер-часом и кулоном имеет место следующее соотношение:

$$1 a \cdot ч = 60 \times 60 = 3600 a \cdot сек = 3600 к.$$

Электрохимический эквивалент выражается в граммах, отнесенных к одному ампер-часу количества электричества ($Г/a \cdot ч$), т. е. это весовое количество вещества, выделившегося из электролита и выраженное в граммах, при прохождении через электролит одного ампер-часа количества электричества.

Обозначив через I неизменную силу тока, протекающего через электролит в течение t ($ч$), а электрохимический эквивалент данного вещества через K , определим весовое количество данного вещества q ($г$), выделившегося за это время:

$$q = Kit.$$

Например, если при прохождении через меднокислый электролит тока в $1 a$ в течение одного часа на катоде выделяется $1,186 г$ меди, то при силе тока в $10 a$ из такого же раствора за $10 ч$ выделится $1,186 \cdot 10 \cdot 10 = 118,6 г$.

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

Из курса химии известно, что одновалентный элемент имеет атомный вес, равный химическому эквиваленту, а n -валентный элемент обладает химическим эквивалентом, в n раз меньшим атомного веса, т. е.

$$a = \frac{A}{n},$$

где A — атомный вес, n — валентность, a — химический эквивалент вещества.

Например, атомный вес алюминия $A = 27$, валентность $n = 3$, следовательно, его химический эквивалент

$$a = \frac{27}{3} = 9.$$

Из сопоставления 1-го и 2-го законов Фарадея вытекает, что электрохимические эквиваленты пропорциональны их химическим эквивалентам, т. е.

$$\frac{K_1}{a_1} = \frac{K_2}{a_2} = \frac{K_3}{a_3}.$$

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

$$\frac{K}{a} = 3,72 \cdot 10^{-2} = 0,372 = \frac{1}{26,8}.$$

Итак, второй закон Фарадея может быть выражен следующим образом:

$$K = \frac{a}{26,8} = \frac{A}{26,8 \cdot n}$$

Пример. Из электролита в течение 10 ч выделилось 50 г цинка. Определить ток, протекающий через электролит. Электрохимический эквивалент цинка $K=1,22 \text{ г/а}\cdot\text{ч}$.

Решение. Согласно первому закону Фарадея имеем:

$$q = KIt,$$

откуда

$$I = \frac{q}{Kt} = \frac{50}{1,22 \cdot 10} = 4,1 \text{ а.}$$

Электролиз получил широкое применение в различных отраслях промышленности. Впервые он был использован для гальванопластики, представляющей собой получение копий с рельефов. С этой целью гипсовый оттиск (негатив) со снимаемого рельефа покрывают слоем графита и погружают в раствор соли металла, который осаждается на оттиске, как на катоде. После удаления гипса получается металлическая копия рельефа.

С помощью электролиза наносят относительно тонкие покрытия одних металлов на другие (гальваностегия). Гальваностегия используется для придания изделиям декоративного вида и для защиты от коррозии. Таким способом производят золочение, серебрение, никелирование и т. д.

Электролиз служит также для очистки (рафинирования) металлов, например меди. Пластины литой меди, полученной путем обжига руды, опускают в качестве анодов в ванны, содержащие раствор медного купороса, подкисленный серной кислотой для повышения проводимости электролита. Катодами в этих ваннах являются тонкие медные кисти, на которых отлагается электролитическая медь, а примеси осаждаются на дно ванны.

Весьма распространен электролитический способ получения едких щелочей натрия, калия и хлора, а также кислорода и водорода путем разложения воды, подкисленной серной кислотой.

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

§ 28. ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

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

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

Простейшим гальваническим элементом является медно-цинковый. В стеклянный сосуд, наполненный раствором серной кислоты H_2SO_4 в воде H_2O , погружены медная Cu и цинковая Zn пластины, которые представляют собой положительный и отрицательный полюсы элемента.

При замыкании цепи элемента каким-либо проводником внутри этого элемента будет протекать ток от цинковой отрицательной пластины к медной положительной, а во внешней цепи — от медной к цинковой. Под действием тока внутри элемента положительные ионы водорода H_2 движутся по направлению тока, отрицательные ионы кислотного остатка SO_4 — в противоположном направлении. Приходя в соприкосновение с медной пластиной, положительные ионы водорода отдают ей свои заряды, а водород в виде пузырьков газа скапливается на ее поверхности. В это же время отрицательные ионы остатка серной кислоты отдают свои заряды цинковой пластине. Таким образом происходит непрерывный заряд пластин элемента, поддерживающий разность потенциалов (напряжение) на его зажимах.

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

Поляризация в рассмотренном элементе настолько значительна, что делает его непригодным для практических целей. Устранение явления поляризации в современных элементах осуществляется посредством поглотителей, вводимых в состав элемента и носящих название *деполяризаторов*, которые предназначены для поглощения водорода и не допускают скопления его на положительном полюсе элемента. Такими деполяризаторами могут служить химические препараты, богатые кислородом или хлором.

Э. д. с. гальванического элемента зависит от химических и физических свойств веществ, его составляющих и, как показывает опыт, не зависит ни от формы и размеров элемента, ни от его внутреннего устройства. Но внутреннее устройство и размеры отдельных частей элемента имеют большое влияние на величину его внутреннего сопротивления, так как они зависят от расстояния между полюсами (при уменьшении этого расстояния внутреннее сопротивление элемента уменьшается), от размера погруженной в жидкость поверхности полюсов (при увеличении этой поверхности внутреннее сопротивление уменьшается), от химического состава жидкости элемента. Необходимо отметить, что внутреннее сопро-

тивление гальванических элементов не является величиной постоянной (по мере работы элемента оно постепенно возрастает).

В зависимости от способа деполяризации гальванические элементы могут быть подразделены на два типа: элементы, в которых в качестве деполяризатора применяют раствор какой-либо соли, например медно-цинковые, и элементы, в которых анод окружен перекисью марганца, например, угольно-цинковые. Гальванические элементы указанных двух типов широко применяют в электротехнике.

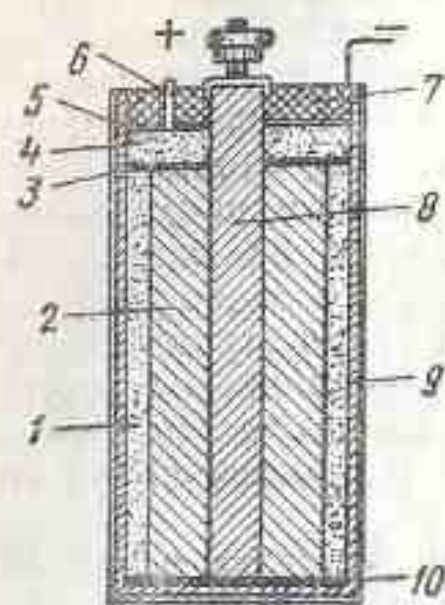


Рис. 24. Сухой гальванический элемент

Э. д. с. медно-цинкового элемента равна 1,1 в, а внутреннее сопротивление в зависимости от времени работы — 5—10 ом.

В угольно-цинковом элементе положительным полюсом служит угольная пластина, а отрицательным — цинковый стержень. Деполяризатором в этом элементе является спрессованная под большим давлением смесь, называемая агломератом. Она состоит из перекиси марганца и графита. В качестве электролита в угольно-цинковом элементе применяют водный раствор хлористого аммония NH_4Cl . Электродвижущая сила угольно-цинкового элемента 1,4—1,5 в в начале разряда при среднем значении 0,9—1,1 в, а внутреннее сопротивление в зависимости от конструкции элемента — 0,25—0,7 ом в начале разряда и 1,4—5 ом в конце.

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

В сухих элементах стаканчикового типа (рис. 24) положительный полюс 8 с агломератом 2 помещают внутри цинковой коробки 9, которая служит отрицательным полюсом элемента. Пространство между стенками цинковой коробки и агломератом заполняют пастой 1, состоящей из раствора хлористого аммония и картофельной муки. Над агломератом укладывают картонную прокладку 3, на которую насыпают прослойку 4 из опилок; сверху опилки закрывают картонной прокладкой 5. Затем элемент заливают смолой 7, в которую вставляют трубку 6. Назначение этой трубки — удалять образующиеся внутри элемента газы.

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

В галетном элементе отрицательным электродом является цинковая пластина, положительным — спрессованный в виде галеты порошок двуокиси марганца с углем. Между электродами поме-

щают картонную пластинку, пропитанную раствором нашатырного спирта. Наружная поверхность цинковой пластины покрыта слоем канифоли с частицами графита для электропроводности.

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

В окисно-ртутных элементах отрицательным электродом является цинк, а положительным — окись ртути. Их преимущество по сравнению с угольно-цинковыми элементами состоит в хорошей сохранности при повышенной температуре, меньшем изменении напряжения при разряде и большой удельной энергии на единицу объема, что особенно ценно для использования в переносной аппаратуре в условиях теплого климата.

В настоящее время широко применяют элементы ВДЛ, электродами которых служит цинк и активированный пористый уголь, адсорбирующий кислород из воздуха, а электролитом — раствор едкого калия. Достоинство этих элементов — малое изменение напряжения при разряде. Вследствие герметичности элементов ВДЛ не происходит заметного ухудшения свойств едкого калия, поэтому они могут храниться неограниченное время. После полного разряда элемента угольный электрод сохраняет работоспособность и элемент может быть восстановлен путем замены цинка и электролита. Такое восстановление элемента можно производить дважды. Э. д. с. элемента ВДЛ 1,4 в, напряжение при нормальном режиме разряда 1,2—1,25 в, напряжение в конце разряда 0,9 в.

Ввиду дефицитности и высокой стоимости цинка желательно использовать в качестве отрицательного электрода какой-либо другой металл, например железо.

В последние годы разработаны железо-угольные щелочные элементы ВДЖ, применяемые для питания радиоустройств в труднодоступных для обслуживания местностях. Однако замена цинка железом привела к уменьшению э. д. с. элемента. Начальное напряжение элемента ВДЖ 0,75 в, напряжение в конце разряда 0,45 в. Элементы ВДЖ выдерживают длительное хранение и нормально работают при температуре 0° С.

Для составления батарей гальванические элементы соединяют между собой последовательно, параллельно и смешанно. При последовательном соединении положительный полюс первого элемента соединяется с отрицательным полюсом второго элемента, положительный полюс второго — с отрицательным третьего и т. д.

Если батарея состоит из n последовательно соединенных элементов с э. д. с. каждого элемента E_0 и с внутренним сопротивлением r_0 ом, то э. д. с. батареи $E = nE_0$, а внутреннее сопротивление ее $r = nr_0$.

При параллельном соединении элементов положительные полюсы всех элементов соединяют между собой и отрицательные полюсы также соединяют между собой. В результате получают два общих полюса батареи: положительный и отрицательный. Если батарея состоит из m параллельно соединенных элементов с э. д. с. каж-

дого элемента E_0 в и с внутренним сопротивлением r_0 ом, то э. д. с. батареи $E = E_0$, а внутреннее сопротивление ее $r = \frac{r_0}{m}$.

Для составления батарей из смешанно соединенных элементов разделяют все элементы на группы с одинаковым числом их в каждой группе. Элементы в каждой группе соединяют параллельно или последовательно, а группы между собой в первом случае — последовательно, а во втором — параллельно.

Если n — число групп или элементов в группе, соединенных последовательно, m — число групп или элементов в группе, соединенных параллельно, E_0 — э. д. с. каждого элемента, а r_0 — внутреннее сопротивление, то э. д. с. батареи $E = nE_0$, а ее внутреннее сопротивление $r = r_0 \frac{n}{m}$.

Пример 1. Четыре гальванических элемента, у которых э. д. с. каждого $E_0 = 1,6$ в и внутреннее сопротивление $r_0 = 8$ ом, соединены параллельно. Определить силу тока в цепи, если батарея замкнута на внешнее сопротивление 6 ом.

Решение. Э. д. с. батареи $E = 1,6$ в, внутреннее сопротивление ее $r = \frac{r_0}{m} = \frac{8}{4} = 2$ ом.

Следовательно, сила тока в цепи

$$I = \frac{1,6}{2+6} = 0,2 \text{ а.}$$

Пример 2. Последовательно соединены 10 гальванических элементов, каждый из которых имеет э. д. с. 1,2 в и внутреннее сопротивление 5 ом. Определить силу тока в цепи, если батарея замкнута на внешнее сопротивление 30 ом.

Решение. Э. д. с. батареи $E = 10 \cdot 1,2 = 12$ в. Внутреннее сопротивление батареи $r = 10 \cdot 5 = 50$ ом. Следовательно, сила тока цепи $I = \frac{12}{50+30} = 0,15$ а.

§ 29. АККУМУЛЯТОРЫ

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

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

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

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

Таким образом электрическая энергия преобразовывается в химическую и аккумулятор становится заряженным.

Химическая энергия может сохраняться определенное время и при надобности легко переходит в электрическую.

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

Электролитом в кислотных аккумуляторах, как указывалось выше, служит раствор серной кислоты определенной плотности. Плотностью раствора или его удельным весом называется число, показывающее, во сколько раз вес этого раствора больше веса воды того же объема.

Для наполнения стационарных аккумуляторов употребляют раствор серной кислоты плотностью 1,21 при $15^\circ C$. Для переносных аккумуляторов применяют раствор серной кислоты плотностью 1,26.

Плотность электролита определяют ареометром. Он представляет собой стеклянную трубку, запаянную с обеих концов и имеющую внутри шкалу с делениями. В нижней расширенной части ареометра находится ртуть или дробь, в результате чего трубка плавает вертикально. Ареометр опускают в сосуд с электролитом. Чем больше плотность электролита, тем выше поднимается ареометр из жидкости. Деление ареометра, расположенное на уровне раствора, показывает плотность электролита.

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

Внутреннее сопротивление аккумуляторов очень мало по сравнению с внутренним сопротивлением гальванических элементов. Это дает возможность считать напряжение на зажимах аккумулятор-

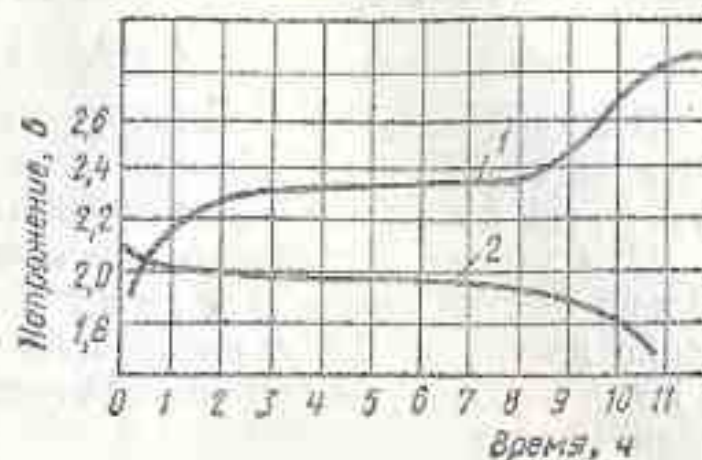


Рис. 25. График напряжения кислотного аккумулятора:

1 — при заряде, 2 — при разряде

ной батарее примерно равным ее э. д. с. Однако внутреннее сопротивление не является постоянной величиной. Оно определяется составом пластин, расстоянием между ними, плотностью и температурой электролита, степенью заряженности аккумулятора. Так, сопротивление разряженного аккумулятора примерно в полтора-два раза больше, чем заряженного.

Э. д. с. аккумулятора зависит от плотности электролита и не зависит от его размеров и номинальной емкости. При плотностях электролита d в пределах 1,1—1,35 э. д. с. аккумулятора

$$E = 0,85 + d [\text{в}].$$

В процессе заряда и разряда аккумулятора плотность электролита не остается постоянной, в связи с этим изменяется как его э. д. с., так и напряжение на его зажимах.

При заряде кислотного аккумулятора напряжение его сравнительно быстро возрастает до 2,2 в (рис. 25, кривая 1), затем медленно достигает 2,3 в, после чего довольно быстро возрастает до 2,6 в и, наконец, медленно увеличивается до 2,7—2,75 в и выше не поднимается.

По достижении напряжения 2,2 в у отрицательной пластины аккумулятора начинают выделяться пузырьки водорода, а при 2,3 в около положительной пластины появляются пузырьки кислорода. При 2,5 в около обеих пластин происходит обильное выделение газов, а когда напряжение достигает 2,6—2,75 в аккумулятор, как говорят, начинает «кипеть».

При заряде аккумулятора увеличивается плотность электролита, вследствие чего напряжение на зажимах аккумулятора повышается. При напряжении 2,4—2,5 в аккумулятор полностью зарядится (заканчивается процесс восстановления активной массы). При дальнейшем процессе заряда происходит электролиз воды, при котором пластины аккумулятора покрываются пузырьками водорода и кислорода, что уменьшает активную поверхность пластин, увеличивая внутреннее сопротивление аккумулятора, вследствие чего увеличивается напряжение на его зажимах. Так как бурное выделение кислорода и водорода разрушает пластины, то в конце заряда следует уменьшить силу зарядного тока.

При разряде кислотного аккумулятора напряжение на его зажимах быстро падает до 2—1,95 в (рис. 25, кривая 2), затем медленно понижается до 1,85—1,8 в и после этого снова быстро уменьшается до нуля.

Понижение напряжения при разряде аккумулятора объясняется тем, что при разряде плотность его электролита уменьшается. Когда напряжение на аккумуляторе достигает значения 1,8 в (при кратковременном разряде 1,75 в), это значит, что вся запасенная в нем энергия израсходована (на обеих пластинах образуется сернистый свинец, являющийся плохим проводником тока). При дальнейшем разряде напряжение быстро уменьшается до нуля. Если аккумулятор отключить от нагрузки, то его напряжение вновь увеличится примерно до 2 в, так как электролит проникает в глубь

пластин в поры активной массы. Однако при включении такого аккумулятора вновь на нагрузку напряжение на его зажимах опять быстро уменьшится до нуля.

Практически разряд доводят только до 1,8 в, так как при разряде ниже 1,8 в аккумулятор приходит в негодность — пластины его частично покрываются белым налетом крупнокристаллического сернистого свинца, который представляет собой настолько плохой проводник, что заряд аккумулятора до номинальной емкости становится невозможным. Это явление называется сульфатацией пластин аккумулятора.

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

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

В отключенном состоянии заряженный аккумулятор теряет часть запасенной им емкости. Это явление носит название саморазряда. Саморазряд аккумулятора увеличивается с повышением температуры и плотности электролита.

Положительные пластины кислотных аккумуляторов изготавливают преимущественно поверхностными из свинца с глубокими бороздами для увеличения поверхности.

Отрицательные пластины кислотных аккумуляторов выполняют коробчатыми. Они представляют собой решетку, в ее ячейках помещается активная масса (свинцовый глет); активную массу закрывают сеткой. Положительные пластины имеют темно-коричневый цвет, отрицательные — светло-серый.

Для увеличения емкости аккумулятора несколько одноименных пластин соединяют параллельно (рис. 26). Каждая группа положительных и отрицательных пластин работает как одна большая пластина, площадь которой равна сумме площадей параллельно соединенных пластин. Так как положительные пластины должны находиться между отрицательными, число отрицательных пластин всегда на одну больше числа положительных. При этом условии обе стороны положительных пластин вступают во взаимодействие с электролитом (при односторонней работе положительные пласти-

ны коробятся и при соприкосновении с отрицательными пластинами может произойти короткое замыкание).

Стационарные кислотные аккумуляторы изготовляют в стеклянных или керамических сосудах. Аккумуляторы больших емкостей имеют сосуды деревянные, выложенные внутри свинцом или кислотостойким изоляционным материалом. Кислотные аккумуляторы применяют на электротехнических установках стационарного типа

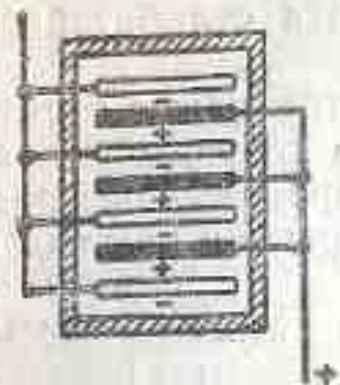


Рис. 26. Схема соединения пластин кислотного аккумулятора

и на автотранспорте. В качестве переносных аккумуляторов используют преимущественно щелочные аккумуляторы.

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

Э. д. с. щелочных аккумуляторов зависит от состояния активной массы пластин. От температуры и плотности электролита э. д. с. зависит незначительно и только при низких температурах, близких к нулю, она резко изменяется. Напряжение в конце заряда аккумулятора равно $\sim 1,8$ в, по окончании заряда $1,5-1,55$ в;

э. д. с. разряженного аккумулятора $1,27-1,3$ в. Напряжение в конце разряда щелочных аккумуляторов зависит от режима разряда и составляет $1,1$ в при 8-часовом, 1 в при 5-часовом, $0,8$ в при 3-часовом и $0,5$ в при 1-часовом разряде.

Внутреннее сопротивление щелочного аккумулятора значительно больше внутреннего сопротивления кислотного.

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

Работу аккумулятора характеризуют его отдача по емкости и отдача по энергии.

Количество электричества Q , полученное аккумулятором во время заряда, называется емкостью аккумулятора при заряде:

$$Q = I_3 T,$$

где I_3 — ток при заряде, а, T — продолжительность заряда, ч.

Количество электричества q , отданное аккумулятором во время разряда, называется емкостью аккумулятора при разряде. Если обозначить разрядный ток I_p , а продолжительность разряда t , то емкость аккумулятора при разряде

$$q = I_p t \text{ [a} \cdot \text{ч]}.$$

Отношение емкости при разряде к емкости при заряде называется *отдачей аккумулятора по емкости* η_1 или по количеству электричества.

$$\eta_1 = \frac{q}{Q} = \frac{I_p t}{I_3 T}.$$

Среднее значение η_1 для кислотных аккумуляторов — $0,85$, а для щелочных — $0,65$.

Если обозначить среднее значение напряжения аккумулятора при его заряде U_3 и время заряда T , то при зарядном токе I_3 электрическая энергия или работа, затраченная на заряд аккумулятора,

$$A_1 = U_3 I_3 T \text{ [вт} \cdot \text{ч]}.$$

Соответственно электрическая энергия, полученная от разряда аккумулятора при среднем напряжении U_p и разрядном токе I_p в течение t (ч), составит:

$$A_2 = U_p I_p t \text{ [вт} \cdot \text{ч]}.$$

Отношение энергии, полученной от аккумулятора при его разряде, к энергии, затраченной на его заряд, называется *отдачей аккумулятора по энергии* η_2 .

$$\eta_2 = \frac{A_2}{A_1} = \frac{U_p I_p t}{U_3 I_3 T}.$$

Среднее значение η_2 для кислотных аккумуляторов — $0,65$, а для щелочных — $0,45$.

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

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

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

Наиболее широкое распространение получили кадмиево-никелевые (КН) и железо-никелевые (ЖН) аккумуляторы, электролитом которых служит раствор едкого калия в воде; плотность электролита $1,2$. По своему устройству и электрическим данным аккумуляторы КН и ЖН незначительно отличаются друг от друга. Активную массу запрессовывают в брикеты (пакеты), а затем из брикетов собирают отдельные пластины. У аккумуляторов типа ЖН отрицательных пластин на одну больше, чем положительных. У аккумуляторов типа КН положительных пластин на одну больше, чем отрицательных. Один из полюсов аккумулятора соединяется с сосудом (у ЖН — отрицательный, а у КН — положительный полюс).

В кадмиево-никелевых аккумуляторах активная масса положительных пластин состоит из гидрата окиси никеля, который для лучшей проводимости смешивают с графитом. Активная масса отрицательных пластин представляет собой гидроокись кадмия и железа.

В настоящее время широко используют аккумуляторы с пористыми пластинами, которые отличаются от обычных кадмиево-никелевых устройством пластины из порошкообразного никеля. Такие пластины дают возможность уменьшить внутреннее сопротивление

аккумулятора в 10 раз по сравнению с внутренним сопротивлением обычного аккумулятора. Поэтому аккумуляторы с пористыми пластинами могут работать при больших разрядных токах в кратковременном режиме.

В железо-никелевых аккумуляторах активной массой положительных пластин является гидрат закиси никеля, смешанный с графитом, а отрицательных пластин — специально приготовленный железный порошок.

Благодаря высоким эксплуатационным показателям за последние годы нашли широкое применение серебряно-цинковые аккумуляторы. Серебряно-цинковый аккумулятор представляет собой пластмассовый сосуд, в котором помещены положительные и отрицательные электроды, составленные из отдельных пластин. Отрицательные электроды, изготовленные из пластин окиси цинка, заключены в защитные пакеты из материала, который хорошо пропускает электролит, но задерживает металлические частицы. Положительные пластины изготовлены из чистого серебра. Электроды жестко соединены с выводными зажимами, надежно удерживающими пластины внутри сосуда. При таком креплении отпадает надобность в поддерживающих сепараторах и решетках, которыми обычно фиксируют положение пластин в аккумуляторах различных типов.

Электролитом серебряно-цинковых аккумуляторов служит водный раствор едкого калия. Для нормальной работы аккумулятора необходимо небольшое количество электролита, что позволяет использовать аккумулятор полусухим и эксплуатировать его в любом положении (вертикально и горизонтально). Трубка, которой закрывается сосуд, водонепроницаема и открывается только на время заряда. При заряде аккумулятор должен находиться в вертикальном положении. Э. д. с. полностью заряженного аккумулятора равна 1,82—1,86 в, напряжение при разряде — примерно 1,5 в.

Достоинством серебряно-цинковых аккумуляторов является малое внутреннее сопротивление; они значительно легче (в 4—6 раз) и меньше по объему, чем кислотные и щелочные.

Серебряно-цинковые аккумуляторы работают при температуре до -59°C , т. е. до замерзания электролита. Верхний предел температуры — $+80^{\circ}\text{C}$. Они переносят относительно большие перепады давления окружающей среды.

Особенно заметны преимущества серебряно-цинковых аккумуляторов перед аккумуляторами других типов при кратковременных разрядах, так как они допускают большие разрядные токи. Например, аккумулятор емкостью 0,5 а·ч может допустить кратковременно ток до 600 а.

Для составления аккумуляторной батареи несколько элементов соединяют последовательно, т. е. катод первого аккумулятора соединяют с анодом второго, катод второго — с анодом третьего и т. д. Получившиеся таким образом свободные электроды, а именно: анод первого элемента и катод последнего являются соответственно положительным и отрицательным полюсами аккумуляторной батареи. При определении э. д. с. аккумуляторной батареи из кис-

лотных аккумуляторов принимают э. д. с. одного элемента, равную 2 в. Следовательно, если в состав аккумуляторной батареи входит n элементов, то ее э. д. с.

$$E = 2n,$$

а внутреннее сопротивление

$$r = nr_0,$$

где r_0 — внутреннее сопротивление одного элемента.

Последовательное соединение элементов используется для увеличения напряжения.

Аккумуляторы можно соединить параллельно, для чего положительные и отрицательные полюсы всех элементов соединяют между собой отдельно. Полученные общие положительный и отрицательный полюсы являются полюсами батареи.

Если батарея состоит из m параллельно соединенных аккумуляторов, то ее э. д. с.

$$E = 2 \text{ в.},$$

а внутреннее сопротивление

$$r = \frac{r_0}{m}.$$

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

Для всякого типа аккумулятора установлены определенные зарядный и разрядный токи, которые зависят от размеров пластин. Эти токи обычно указываются аккумуляторным заводом.

Если батарея состоит из n последовательно и m параллельно соединенных кислотных аккумуляторов, то ее э. д. с. $E = 2n \text{ в.}$, а внутреннее сопротивление $r = r_0 \frac{n}{m}$.

Э. д. с. щелочного аккумулятора в значительной степени меняется с изменением степени его заряженности. Поскольку э. д. с. щелочного аккумулятора меньше, чем кислотного, для получения одинаковых э. д. с. батарея щелочных аккумуляторов должна иметь больше последовательно соединенных элементов, чем батарея кислотных аккумуляторов.

Пример 1. Кислотный аккумулятор СК-2 имеет емкость 72 а·час при десятичасовом разряде и отдачу по емкости $\eta_1 = 0,85$. Определить ток для заряда аккумулятора в течение шести часов; энергию, отданную аккумулятором при разряде и полученную им при заряде; отдачу аккумулятора по энергии, если среднее напряжение при заряде 2,35 в и при разряде 1,9 в.

Решение. Зарядный ток аккумулятора

$$I = \frac{Q}{T} = \frac{q}{\eta_1 T} = \frac{72}{0,85 \cdot 6} = 14,1 \text{ а.}$$

Энергия, отданная аккумулятором при разряде,

$$A_2 = U_p I_p T = 1,9 \cdot 72 = 136,8 \text{ ат·ч.}$$

Энергия, полученная аккумулятором при заряде,

$$A_1 = U_3 I_3 T = 2,35 \cdot 14,1 \cdot 6 = 198,8 \text{ ат.ч.}$$

Отдача аккумулятора по энергии

$$\eta_{12} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{136,8}{198,8} = 0,68.$$

Пример 2. Для электропитания автоматической телефонной станции требуется постоянный ток при напряжении 60 в. Определить число кислотных аккумуляторов, соединенных последовательно в батарею, чтобы она в конце разряда обеспечила нужное напряжение.

Решение. Так как напряжение кислотного аккумулятора в конце разряда равно 1,8 в, то число аккумуляторов в батарее должно быть:

$$n = \frac{60}{1,8} = 33.$$

§ 30. АТОМНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

В настоящее время находят применение атомные элементы, конструкция которых различна в зависимости от принципа их действия.

В элементах, использующих β -излучение, на одном из электродов (внутреннем) помещается радиоактивный изотоп стронция-90. Вторым электродом является металлическая оболочка. Между электродами находится твердый диэлектрик (полистирол и др.) или вакуум. Под действием β -лучей на электродах создаются электрические заряды. Напряжение в таких элементах может достигать нескольких киловольт, а внутреннее сопротивление очень велико (порядка 10^{13} ом). Сила разрядного тока не превышает одного миллиампера (при большей силе тока возникает опасность из-за радиации). Срок службы атомных элементов очень велик.

В элементах, принцип действия которых основан на разности потенциалов, применяют электроды в виде пластинок из различных материалов. Одна из пластин покрыта двуокисью свинца, другая изготовлена из алюминия. Между электродами находится смесь инертного газа (аргона, криптона и т. д.) и радиоактивного элемента. Под действием излучения образуются ионные пары. Напряжение между электродами определяется контактной разностью потенциалов. Под действием этого напряжения положительно и отрицательно заряженные ионы перемещаются к электродам.

В элементах с облучаемыми полупроводниками радиоактивное вещество наносят на поверхность полупроводника (кремния). Излучаемые электроны, имеющие большую скорость, выбивают из атомов полупроводника большое количество электронов, обладающих малым запасом энергии. В результате односторонней проводимости между полупроводником и коллектором, приваренным к нему, возникает небольшая э. д. с. (несколько десятых долей вольта). Внутреннее сопротивление таких элементов 100—1000 ом и к. п. д. их может достигать нескольких процентов. Недостатком их является малый срок службы вследствие разрушения полупроводника под действием радиации.

В фотоэлектрических атомных элементах используется процесс перехода энергии ядерного распада в световую энергию, которая затем преобразуется в электрическую.

§ 31. ТЕРМОЭЛЕМЕНТЫ

Термоэлементы непосредственно преобразуют тепловую энергию в электрическую.

На рис. 27 изображены две проволоочки 1 и 2, изготовленные из различных металлов и спаянные в точках 3 и 4. Если температура в местах спаев одинакова, то тока в таком замкнутом контуре возникать не будет, потому что в этих местах создаются равные и противоположные э. д. с. Но если один из спаев нагреть так, чтобы температура его стала выше температуры второго спаю, то равенство э. д. с. нарушится и в цепи появится электрический ток.

Пара проводников из различных металлов называется *термопарой*, а возникающая в ней э. д. с. — *термоэлектродвижущей силой*.

Положим, что проводник 1 изготовлен из меди, а проводник 2 — из висмута. Если нагреть один из спаев, например 4, то потенциал висмутовой проволоки окажется выше потенциала медной проволоки и поэтому электрический ток будет протекать от висмута к более холодному спаю 3, а затем по меди к более теплему спаю 4, как будто бы висмут стал положительным, а медь — отрицательным полюсом гальванического элемента. Если спай 4 охладить, оставив другой спай 3 при прежней температуре, то при этом возникнет электрический ток, но обратного направления.

Величина термо-э. д. с. и, следовательно, тока, протекающего в термопаре, зависит от выбранных металлов для проводников 1 и 2 и от разности температур в местах спаев.

Опытным путем установлено, что при малых разностях температур термо-э. д. с. пропорциональна разности температур мест спаев. При больших разностях температур эта зависимость нарушается. Пропорциональность между термо-э. д. с. и разностью температур позволяет использовать термопару для измерения температур (в известных пределах).

Термо-э. д. с. возникает также в том случае, если два различных вещества только соприкасаются и место соприкосновения подвергается нагреву.

Э. д. с. термопар относительно мала. Возникновение термо-э. д. с. возможно и тогда, когда какое-либо вещество подвергается неравномерному нагреву.

Если, например, концы металлического стержня имеют различную температуру, то между ними появляется разность потенциалов или э. д. с., пропорциональная разности температур этих концов. Это объясняется тем, что кинетическая энергия электронов больше в том конце металлического стержня, температура которого выше.

Если один конец стержня нагрет сильнее, чем второй, то кинетическая энергия электронов в более нагретом конце будет больше, чем в более холодном. Поэтому в стержне будет происходить уравновешивание носителей зарядов, часть электронов с более нагретого

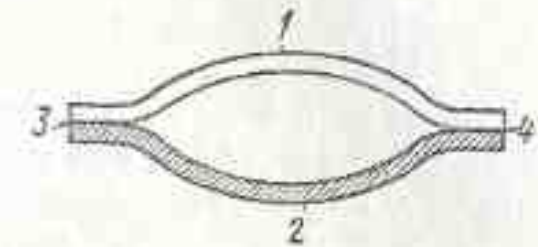


Рис. 27. Термопара

конца перейдет к другому концу. Таким образом, на более нагретом конце образуется недостаток электронов, а на другом конце — избыток электронов, благодаря чему более нагретый конец приобретает положительный потенциал, а противоположный конец — отрицательный, т. е. между ними возникнет разность потенциалов. При увеличении разности температур между концами стержня возрастет число электронов, переходящих с одного конца на другой, и, следовательно, увеличится э. д. с.

Если взять два проводника из различных металлов и соединить концы их проволокой, то в месте соединения появится разность потенциалов несмотря на то, что температура соединенных концов проводников одинакова. Это объясняется неравенством «электронного давления» в металлах, из которых изготовлены проводники. Из металла с большим «электронным давлением» часть электронов перейдет в металл с меньшим «электронным давлением», в результате чего в проволоке возникает ток.

Термоэлементы используют в качестве источников электрической энергии малой мощности, например, для питания радиоприемников. В простейшем виде термоэлектрический генератор представляет собой батарею термопар, у которых одни концы спаев нагреваются, а вторые имеют достаточно низкую температуру.

Под действием разности температур концов спая термопара создается термо-э. д. с., и во внешней цепи протекает ток. Каждая термопара может состоять из двух разнородных проводников, двух разнородных полупроводников или из проводника и полупроводника.

Высокая теплопроводность металлических термопар не позволяет создавать значительную разность температур спаев, а следовательно, не дает возможности получать термо-э. д. с. большой величины. Поэтому в термогенераторах используют полупроводниковые термопары, а иногда — термопары из проводника и полупроводника.

В термопаре, состоящей из полупроводника с n и p проводимостями, процесс возникновения термо-э. д. с. протекает следующим образом. При нагревании спая число электронов в полупроводнике n и число электронных дырок в полупроводнике p резко увеличивается под влиянием температурных особенностей, свойственных полупроводникам.

Электроны и дырки вследствие диффузии в полупроводниках движутся от горячего спая термопары к холодному. Перемещение дырок приводит к тому, что горячий конец полупроводника p заряжается отрицательно, а холодный конец — положительно. В полупроводнике n электроны, переходя от горячего конца к холодному, так же как и в металле, заряжают горячий конец положительно, а холодный конец — отрицательно. Термо-э. д. с. пары полупроводников много больше термо-э. д. с. металлической пары.

В промышленных термоэлектродгенераторах основным элементом является полупроводниковая термопара с э. д. с. 1 мв на 1°C и к. п. д. около 7% .

В средних широтах на 1 м^2 земной поверхности солнце излучает (в среднем) энергию зимой 80 вт и летом 300 вт , а при прямом солнечном освещении — до 1000 вт .

Одним из методов использования тепла солнечных лучей является сооружение солнечных тепловых электростанций. В такой электростанции имеется параболическое зеркало или система зеркал, с помощью которой тепловая энергия солнечных лучей концентрируется в фокусе зеркал, где устанавливается бак с водой. Под действием тепла солнечных лучей вода в баке нагревается, превращается в пар, которым приводится в действие паровая машина или турбина, вращающая ротор электрического генератора. Такие электротепловые установки не являются непосредственными преобразователями энергии и их использование связано со значительным расходом энергии и требует применения громоздких и дорогостоящих вспомогательных устройств.

Одним из методов преобразования энергии солнечных лучей в электрическую является термоэлектрический, при котором используется поглощающее зеркало или коллектор с термоэлектрическим генератором. Однако этот метод не может служить для получения больших мощностей, так как термобатареи генератора имеют большое внутреннее сопротивление.

Более просто преобразуется энергия солнечных лучей в электрическую при помощи фотоэлектрического метода. Благодаря простоте устройства и малому весу фотоэлектрические преобразователи находят широкое использование в качестве источников электрической энергии малой мощности.

Солнечные батареи или фотоэлектрические преобразователи представляют собой несколько фотоэлементов, соединенных между собой. Последовательное соединение фотоэлементов дает возможность повысить напряжение, параллельное соединение увеличивает ток в цепи нагрузки. В солнечных батареях фотоэлементы соединяются последовательно в одну ветвь и отдельные ветви между собой соединяются параллельно.

Простейшим фотоэлементом является селеновый. Селеновые фотоэлементы имеют очень низкий к. п. д. (менее $0,1\%$) и обладают большим внутренним сопротивлением, вследствие чего они не нашли применения для солнечных батарей.

Кроме селена, для изготовления фотоэлементов применяют селенит таллий, закись меди, сернистое серебро, германий и кремний.

В настоящее время для фотоэлектрических преобразователей используют кремниевые фотоэлементы, представляющие собой полупроводники с $p-n$ -переходами.

Солнечные батареи используют в качестве источника электрической энергии для радиоприемников с полупроводниковыми приборами, а также наряду с химическими источниками электрической энергии для питания радиотехнической и телеметрической

аппаратуры в спутниках земли и в автоматических межпланетных станциях.

Солнечная батарея, расположенная на поверхности корпусов спутника и автоматической межпланетной станции, снабжает электрической энергией коротковолновый радиопередатчик и заряжает аккумуляторную батарею, от которой в ночное время получает электропитание аппарата.

Промышленностью освоено производство солнечных батарей двух типов: прямоугольной, развивающей в летний ясный день 5 в при токе 20 ма, и шестиугольной, обеспечивающей в тех же условиях 7 в при токе 40 ма.

Солнечные батареи просты по устройству, имеют неограниченный срок службы и работают в большом диапазоне изменения температуры. Это делает весьма перспективным применение солнечных батарей для питания радиоаппаратуры шаров-зондов, ракет и т. д. Недостатком солнечных батарей является высокая стоимость изготовления химически чистого кремния.

Помимо кремневых солнечных батарей, строят также батареи на основе сульфидно-кадмиевых и арсенидо-галлиевых элементов, которые имеют весьма высокие показатели.

Контрольные вопросы

1. В каких единицах измеряют э. д. с., напряжение и силу тока?
2. От чего зависит сопротивление металлического проводника?
3. Сформулируйте закон Ома для замкнутой электрической цепи и для ее участка.
4. Каково соотношение между э. д. с. и напряжением на зажимах источника энергии?
5. Как определяется сила тока при коротком замыкании зажимов источника энергии?
6. Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа.
7. Как измеряют общее сопротивление при последовательном, параллельном и смешанном соединении потребителей энергии?
8. Как определить напряжение на зажимах двух параллельно соединенных источников энергии с различными э. д. с., замкнутых на какой-либо потребитель энергии?
9. Чему равна работа и мощность электрического тока и в каких единицах они измеряются?
10. Сформулируйте закон Ленца — Джоуля.
11. Как определяется количество теплоты, выделяющейся в проводнике, по которому протекает ток?
12. Где используется нагрев проводников протекающими в них токами?
13. Сформулируйте первый и второй законы Фарадея.
14. Объясните устройство сухих гальванических элементов.
15. Как устроены кислотный и щелочной аккумуляторы?
16. Что называется емкостью аккумулятора и от чего она зависит?

ГЛАВА III ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

§ 33. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Уже в глубокой древности была известна руда, обладающая свойством притягивать к себе железо. Она представляет собой химическое соединение железа с кислородом и является естественным природным магнитом.

В технике применяют не природные, а искусственные постоянные магниты. Искусственным постоянным магнитом называется намагниченный брусок из стали или из специальных сплавов.

Постоянные магниты могут иметь различную форму: прямоугольную, ромбическую, цилиндрическую, подковообразную, кольцеобразную и т. д.

Каждый магнит имеет два полюса: северный и южный. Одноименные полюсы магнитов взаимно отталкиваются, а разноименные притягиваются.

Вокруг любого магнита независимо от его размера и формы существует магнитное поле, которое представляет собой одну из форм материи. Под действием магнитного поля кусочек стали, помещенный вблизи магнита, притягивается к нему. По этой же причине происходит взаимодействие магнитов — их взаимное притяжение и отталкивание. Стрелка компаса устанавливается в определенном направлении также в результате воздействия сил магнитных полей, создаваемых земным магнетизмом и ее магнитными полюсами.

Магнитное поле наглядно изображается с помощью магнитных линий (линий индукции), вдоль которых действуют притягивающие и отталкивающие силы. Принято считать, что магнитные линии направлены от северного полюса магнита к южному. В связи с этим при изображении магнитного поля магнитные линии обозначают стрелками (рис. 28).

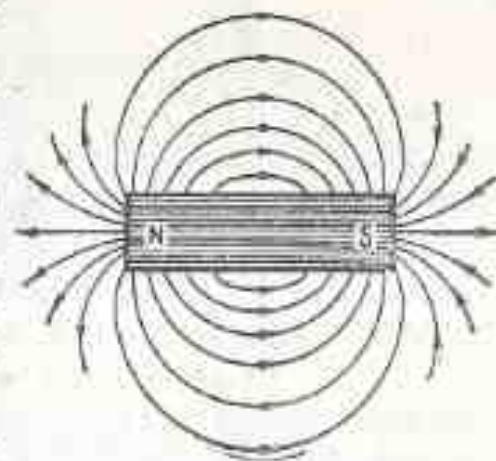


Рис. 28. Магнитное поле постоянного магнита

Магнитные и электрические явления тесно связаны между собой. В этом можно убедиться на опыте.

Поднесем магнитную стрелку, насаженную на острие, к прямому медному проводнику, не включенному в электрическую цепь. Стрелка, как обычно, установится так, что будет своими концами показывать направление на северный и южный полюсы земли,

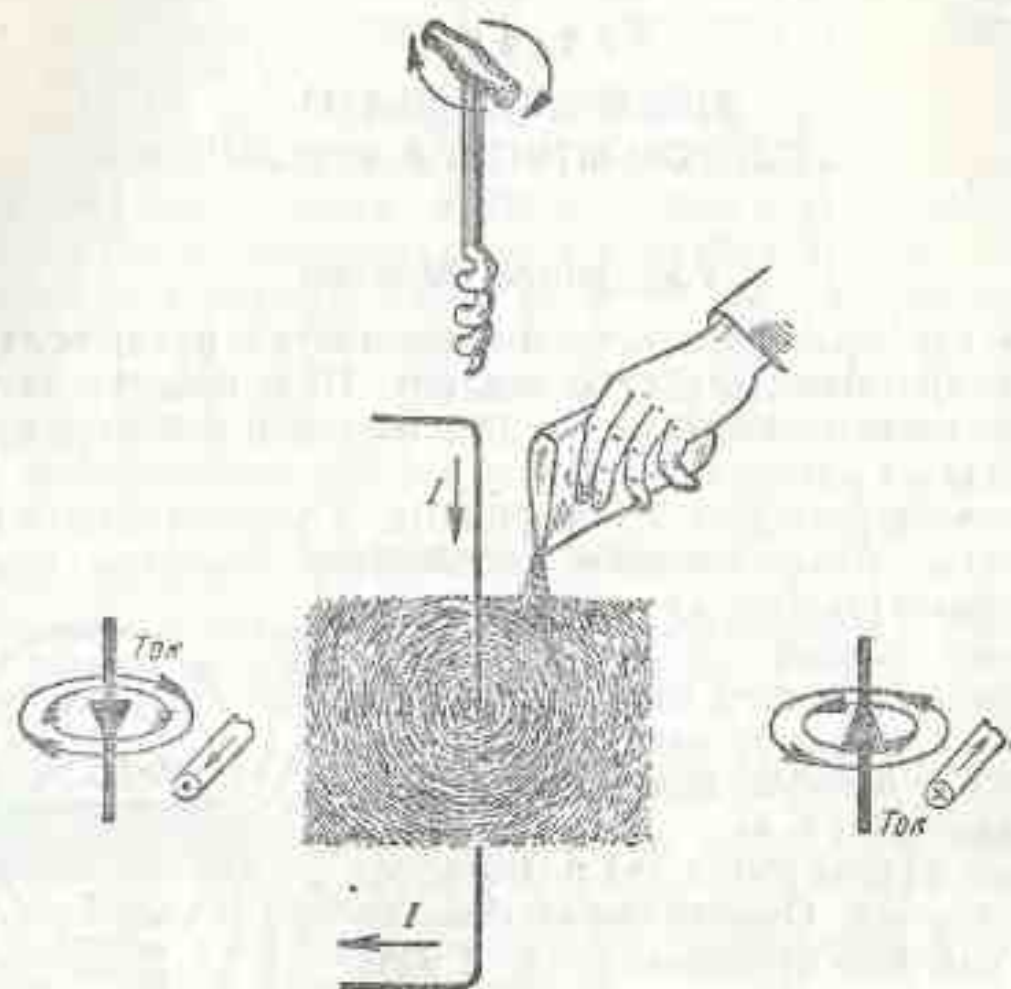


Рис. 29. Магнитное поле прямого проводника, по которому протекает ток

Если теперь по этому проводнику пропустить электрический ток достаточной силы, то стрелка, поднесенная к нему, повернется и установится перпендикулярно оси проводника. При прекращении тока в проводнике стрелка возвратится в первоначальное положение. Стрелка отклонится в противоположную сторону, если изменить направление тока в проводнике. Из этого опыта можно сделать следующий вывод: *при прохождении электрического тока по проводнику в окружающем пространстве возникает магнитное поле. При прекращении тока магнитное поле исчезает.*

Магнитные линии — линии индукции, возникающие вокруг проводника, по которому проходит ток, располагаются по окружностям, центром которых является ось проводника. Это легко доказать при помощи несложного опыта.

Вставим в отверстие положенного горизонтально листа картона проводник и пропустим по нему электрический ток (рис. 29). Из пакета насыпем на картон стальные опилки. Слегка ударя пальцем по листу картона, заметим, что опилки располагаются вокруг проводника в определенном порядке — по окружностям, соответствующим магнитным линиям.

При изображении магнитного поля, создаваемого вокруг проводника с током, в центре этого поля показывают не весь проводник, а только его сечение. Когда ток направлен от нас, в кружке, изображающем сечение проводника, ставят знак «х»; если же ток течет к нам, в кружке ставят точку (·).

Направление магнитных линий определяется по правилу буравчика, которое формулируется так: *если поступательное движение буравчика совпадает с направлением тока в проводнике, то направление магнитных линий совпадает с направлением вращательного движения рукоятки буравчика.*

Магнитное поле возникает не только вокруг прямолинейного проводника, по которому проходит ток, но и вокруг проводника, согнутого в кольцо. В этом случае у кольцевого проводника можно различить, как у постоянного магнита, два полюса — северный и южный. Данное свойство магнитного поля кольцевого проводника используется в электромагнитах (см. § 42).

§ 35. ПОНЯТИЕ О ПРИРОДЕ МАГНЕТИЗМА

Открытие Эрстедом в начале XIX в. магнитного поля электрического тока позволило сделать предположение, что природа магнетизма связана с электрическим током, образующимся внутри молекул. В наше время установлено, что магнитное поле в намагниченных телах возбуждается в основном электронами, которые вращаются вокруг собственной оси и вокруг ядра атома.

Как известно, движение электронов представляет собой электрический ток, а прохождение тока сопровождается возникновением магнитного поля. Следовательно, электроны при своем движении внутри атомов создают внутриатомные токи, возбуждающие магнитные поля.

Чем же объяснить то, что в одних материалах магнитное поле имеет существенную величину и они намагничиваются, в то время как в других магнитного поля нет и они не намагничиваются. Происходит это потому, что оси и орбиты вращения отдельных электронов в атомах могут находиться в различных положениях друг относительно друга, а следовательно, в таких же положениях находятся и создаваемые движущимися электронами магнитные поля.

Таким путем среда, в которой возбуждается магнитное поле, воздействует на него, усиливая или ослабляя это поле.

Материалы, магнитное поле которых ослабляет результирующее поле, называются *диамагнитными*, а материалы, весьма слабо усиливающие магнитное поле, — *парамагнитными*.

Исключенные составляет особая группа парамагнитных материалов, в которых значительно усиливается магнитное поле. Это железо, никель, кобальт и гадолиний (и их сплавы). Такие материалы называются *ферромагнитными*. Они широко используются в электрических машинах и аппаратах для усиления магнитных полей и придания им нужной формы.

§ 36. МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Опыт показывает, что на проводник с током, находящийся в магнитном поле (рис. 30, а), действует механическая сила, стремящаяся сместить его. Возникновение этой силы можно пояснить так. Если по проводнику течет электрический ток в направлении, указанном на рис. 30, б, то направления магнитных

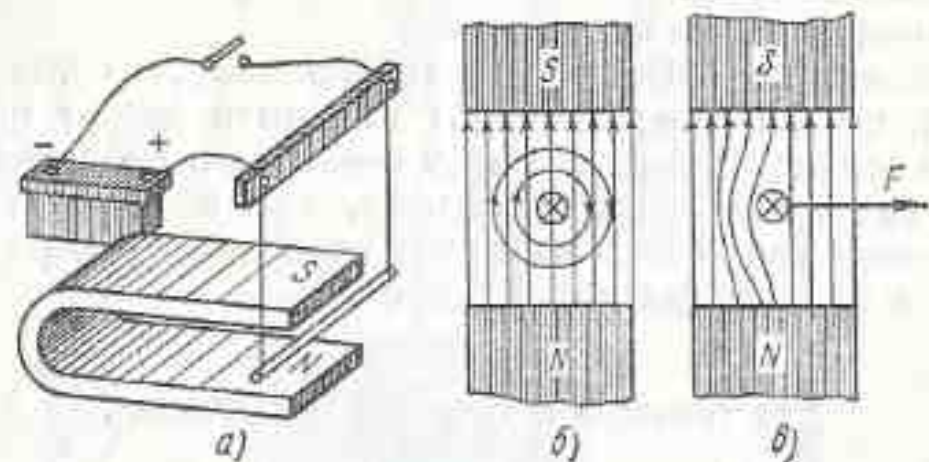


Рис. 30. Смещение проводника с током, находящегося в магнитном поле.

а — проводник с током в магнитном поле, б — магнитные поля магнита и проводника с током, в — проводник с током смещается в магнитном поле под действием силы F .

линий магнита и поля, создаваемого током слева от проводника, совпадают, усиливая общее магнитное поле. В то же время справа магнитные линии обоих магнитных полей взаимно вычитаются, ослабляя общее магнитное поле.

Магнитные линии общего поля, как бы стремясь укоротиться (рис. 30, в), создают усилие F , действующее на проводник в направлении, указанном стрелкой. Сила, действующая на проводник с током, будет возрастать по мере увеличения активной длины проводника и тока, протекающего в нем. Эта сила также увеличивается, если слабый магнит, создающий магнитное поле малой интенсивности, заменить сильным.

Из сказанного следует, что сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током, пропорциональна силе тока, активной длине проводника l и интенсивности магнитного поля — магнитной индукции.

$$F = BIl, \quad (30)$$

где F — сила, н,

I — сила тока, а,

l — длина проводника, м,

B — магнитная индукция, тесла (тл); $1 \text{ тл} = 1 \text{ вб/м}^2$.

Формула (30) верна лишь при перпендикулярном расположении проводника с током к магнитным линиям равномерного магнитного поля. Если проводник находится в магнитном поле под каким-либо углом α по отношению к магнитным линиям, то сила

$$F = BIl \sin \alpha,$$

где α — угол между проводником и направлением магнитных линий.

Направление силы, действующей на проводник с током, помещенный в магнитное поле, определяют посредством *правила левой руки* (рис. 31): если левую руку расположить в магнитном поле так, чтобы магнитные линии входили в ладонь, и направить вытянутые четыре пальца по направлению тока, то отогнутый большой палец укажет направление силы, действующей на проводник.

Пример. Вычислить, с какой силой магнитное поле, созданное током, действует на проводник, если магнитная индукция поля $B = 1,5 \text{ тл}$, рабочая длина проводника $l = 0,4 \text{ м}$ и по нему протекает ток $I = 50 \text{ а}$.

Решение. Сила, действующая на проводник: $F = BIl = 1,5 \cdot 50 \cdot 0,4 = 30 \text{ н}$.

Так как $1 \text{ н} = 0,102 \text{ мкГ}$, то $F = 30 \cdot 0,102 = 3,06 \text{ мкГ}$.

На явлении взаимодействия магнитного поля и проводника с током основано устройство различных электрических машин и приборов. Из формулы (30) следует что магнитная индукция

$$B = \frac{F}{Il}$$

Таким образом, магнитная индукция B — это величина, о которой можно судить по силе действия магнитного поля на проводник с током, помещенный в пределах этого поля. Магнитная индукция является направленной величиной — физическим вектором, перпендикулярным силе, смещающей проводник с током.

Если на проводник с током в 1 а, длиной в 1 м, расположенный в равномерном магнитном поле перпендикулярно магнитным линиям, действует сила в 1 н, то магнитная индукция такого поля равна 1 тл.

Величина в 10 000 раз меньшая, чем тесла, называется *гауссом* ($1 \text{ тл} = 1 \text{ вб/м}^2 = 10\,000 \text{ гс}$). Гаусс — это единица магнитной индукции в системе CGSM.

Пример. Вычислить магнитную индукцию поля, если оно действует на проводник с силой 6 н. Рабочая длина проводника, помещенного в магнитное поле, составляет 0,5 м, а сила тока, протекающая в нем, 30 а.

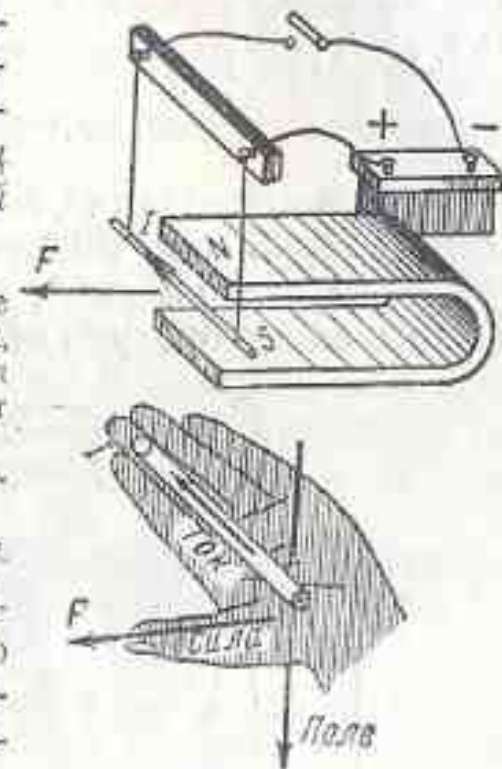


Рис. 31. Правило левой руки

$$B = \frac{F}{l} = \frac{6}{30 \cdot 0,5} = 0,4 \text{ тл.}$$

Так как $1 \text{ тл} = 10\,000 \text{ гс}$, то $B = 0,4 \text{ тл} = 4000 \text{ гс}$.

Магнитную индукцию можно наглядно представить, если условиться изображать ее графически количеством магнитных линий, приходящихся на единицу площади (см^2 или м^2) намагниченного материала, перпендикулярной направлению магнитных линий. Так, если на 1 см^2 поверхности ферромагнитного материала приходится 2500 магнитных линий ($2500 \text{ гс} = 0,25 \text{ вб/м}^2$), а на 1 см^2 другого материала приходится 7500 магнитных линий ($7500 \text{ гс} = 0,75 \text{ вб/м}^2$), то магнитная индукция во втором материале больше магнитной индукции в первом материале в три раза. Чем больше магнитная индукция, тем гуще расположены магнитные линии.

§ 37. НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Возьмем проводник, свитый в виде спирали, и пропустим по нему электрический ток. Вокруг каждого витка такой спирали, которую называют соленоидом*, возникнут магнитные линии. Эти линии, складываясь, образуют общее магнитное поле (рис. 32, а).

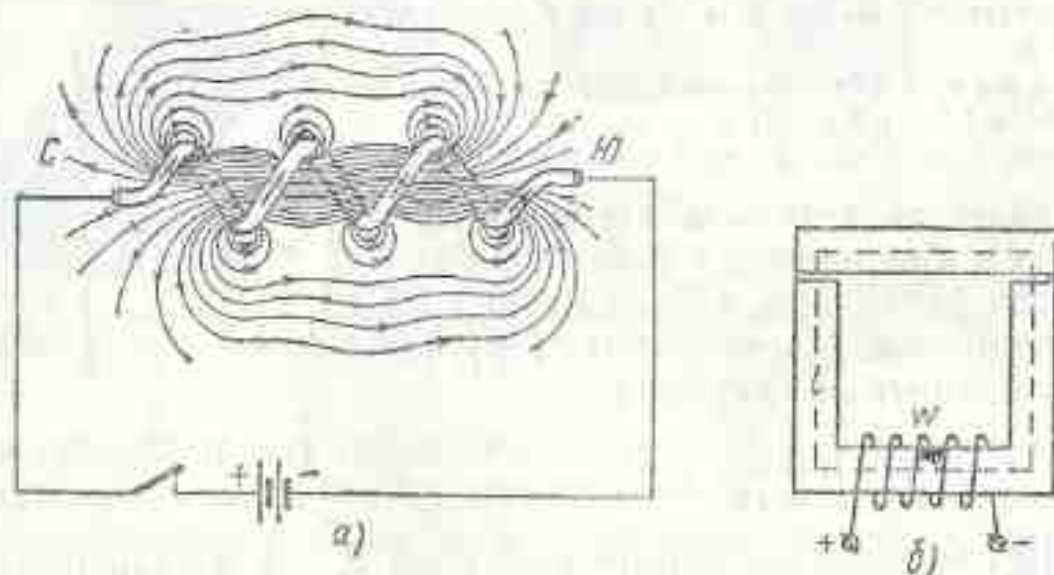


Рис. 32. Соленоид (а) и электромагнит (б)

Магнитное поле катушки (соленоида) имеет большое сходство с магнитным полем прямолинейного постоянного магнита. У катушки, так же как у постоянного магнита, есть два полюса — северный и южный.

Чем больше ток в катушке и чем больше число ее витков, тем сильнее создаваемое магнитное поле.

Намагничивающая сила катушки, по виткам которой протекает электрический ток, равна произведению числа витков W обмотки на силу тока I , протекающего по ней.

* Соленоид происходит от греч. слова *solēn* — трубка и *eidos* — вид.

$$F = IW.$$

Намагничивающую силу иногда называют магнитодвижущей силой.

Если одна катушка имеет обмотку из 1000 витков проволоки и по ней протекает ток $0,5 \text{ а}$, а другая катушка имеет 3000 витков и по ней протекает ток такой же силы, то первая катушка обладает намагничивающей силой

$$F_1 = IW_1 = 0,5 \cdot 1000 = 500 \text{ а},$$

а намагничивающая сила второй катушки

$$F_2 = IW_2 = 0,5 \cdot 3000 = 1500 \text{ а},$$

т. е. в три раза больше.

Для характеристики условий возбуждения магнитного поля применяют величину, называемую напряженностью магнитного поля.

Напряженность магнитного поля катушки зависит от силы тока, протекающего по ее виткам, числа витков, а также от ее геометрических размеров.

$$H = \frac{IW}{l},$$

где l — средняя длина магнитной линии, м (рис. 32, б);

H — напряженность магнитного поля (в СИ измеряется в а/м).

Величина, в 80 раз большая 1 а/м , называется эрстедом. Это единица измерения напряженности магнитного поля в системе CGSM ($1 \text{ э} = 80 \text{ а/м}$).

Приведенная формула позволяет определить напряженность поля катушки, если длина последней во много раз (в 10—20 и более) больше ее диаметра.

Пример. Обмотка, намотанная на цилиндрический каркас длиной $l = 0,3 \text{ м}$, состоит из 1800 витков и по ней протекает ток $I = 0,2 \text{ а}$. Вычислить напряженность магнитного поля внутри этой катушки.

Решение. Напряженность магнитного поля внутри катушки

$$H = \frac{IW}{l} = \frac{0,2 \cdot 1800}{0,3} = 1200 \text{ а/м.}$$

Так как $1 \text{ э} = 80 \text{ а/м}$, то $1200 \text{ а/м} = 15 \text{ э}$.

Можно считать, что магнитная индукция B возникает под действием напряженности магнитного поля H . Отношение $\frac{B}{H}$ зависит от магнитных свойств среды.

§ 38. МАГНИТНЫЙ ПОТОК

Магнитное поле характеризуется также величиной, носящей название магнитного потока. Магнитный поток можно представить (если условиться изображать его графически) общим числом магнитных линий, проходящих через всю рассматриваемую поверхность. В частности, под магнитным потоком Φ , проходящим через площадь S , перпендикулярную магнитным линиям, понимают произведение величины магнитной индукции B на величину площади, которая пронизывается этим магнитным потоком.

$$\Phi = BS.$$

Подставив в эту формулу значение магнитной индукции в теслах ($1 \text{ тл} = 1 \text{ вб/м}^2$) и значение площади в квадратных метрах, получим магнитный поток в веберах (СИ). Если величина магнитной индукции выражена в гауссах, а поперечное сечение материала в квадратных сантиметрах, то величина магнитного потока выразится в максвеллах — единицах системы CGSM.

$$1 \text{ мкс} = \frac{1}{100\,000\,000} \text{ вб, а } 1 \text{ вб} = 100\,000\,000 \text{ мкс}$$

Пример. Магнитная индукция стали $B = 1,5 \text{ тл}$, площадь поперечного сечения сердечника, изготовленного из этой стали, $0,003 \text{ м}^2$. Вычислить магнитный поток, пронизывающий этот сердечник.

Решение. Магнитный поток в сердечнике

$$\Phi = BS = 1,5 \cdot 0,003 = 0,0045 \text{ вб.}$$

Так как $1 \text{ вб} = 10^8 \text{ мкс}$, то $0,0045 \text{ вб}$ составляет $450\,000 \text{ мкс}$. Это значит, что через сечение сердечника проходит $450\,000$ магнитных линий.

§ 39. НАМАГНИЧИВАНИЕ СТАЛИ. МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Для усиления магнитного поля и придания ему определенной формы в различных электрических машинах и аппаратах широко применяют ферромагнитные материалы: железо, кобальт, никель и их сплавы — сталь и др.

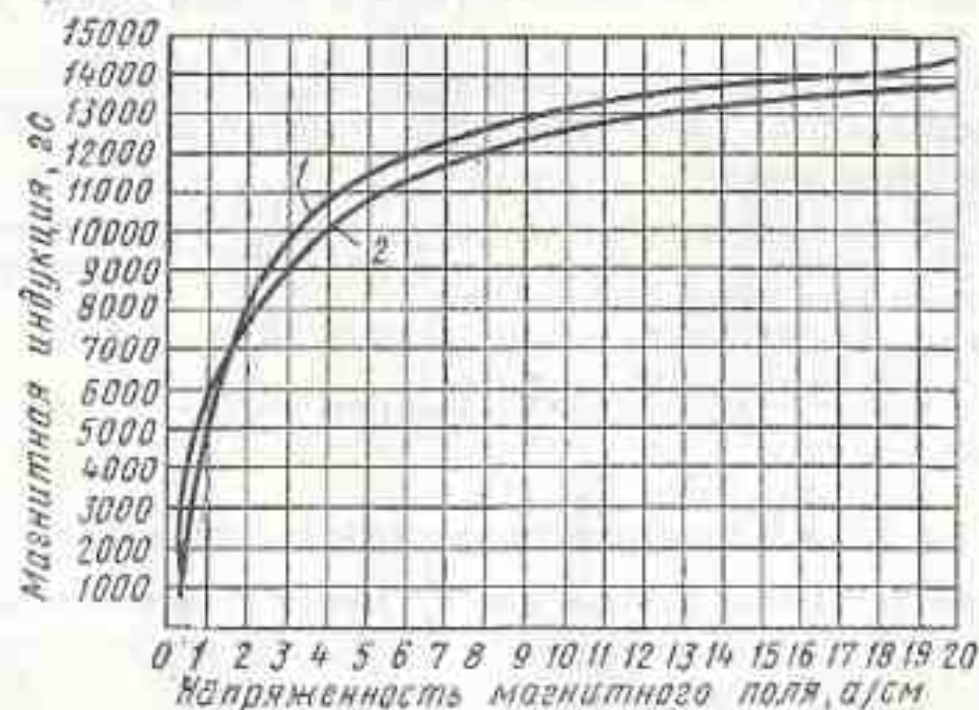


Рис. 33. Кривые намагничивания:

1 — трансформаторной стали, 2 — слаболегированной стали

Если ферромагнитный материал поместить в катушку и пропустить по ее виткам электрический ток, то под воздействием магнитного поля, созданного током, материал намагнитится. Это значит, что в материале образуется собственное магнитное поле, полученное в результате сложения магнитных полей (магнитных моментов) отдельных атомов.

Изменение силы тока в катушке приводит к изменению напряженности ее магнитного поля H , что вызывает изменение магнитной индукции B в сердечнике этой катушки.

На рис. 33 показаны графики изменения магнитной индукции в зависимости от напряженности намагничивающего магнитного поля. Такие графики называются кривыми намагничивания. Для различных материалов и их марок кривые намагничивания различны. При небольших значениях напряженности поля H магнитная индукция в материале быстро увеличивается, намагничивание происходит примерно пропорционально изменению напряженности, а затем, по мере увеличения напряженности магнитного поля, возрастание магнитной индукции материала замедляется.

Состояние материала, при котором дальнейшее увеличение напряженности магнитного поля не приводит к возрастанию его намагниченности, называется *магнитным насыщением*.

Магнитные свойства материалов характеризуются их абсолютной магнитной проницаемостью μ_a . Она определяется отношением магнитной индукции B к напряженности магнитного поля H и измеряется в генри/метр (гн/м).

$$\mu_a = \frac{B}{H} \quad (31)$$

Абсолютная магнитная проницаемость вакуума $\mu_a = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ гн/м}$. Для воздуха и других неферромагнитных материалов она незначительно отличается и при технических расчетах принимается равной $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ гн/м}$.

Так как абсолютная магнитная проницаемость для вакуума и указанных выше материалов практически одинакова, то μ_a называется *магнитной постоянной* μ_0 .

Абсолютная магнитная проницаемость μ_a ферромагнитных материалов непостоянна и во много раз превышает магнитную проницаемость вакуума.

Число, показывающее, во сколько раз абсолютная магнитная проницаемость μ_a ферромагнитного материала больше магнитной постоянной μ_0 , называется *относительной магнитной проницаемостью* μ или сокращенно *магнитной проницаемостью* (табл. 3).

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0} \quad (32)$$

Пример. Сталь в определенных условиях обладает абсолютной магнитной проницаемостью $\mu_a = 0,0008792 \text{ гн/м}$. Вычислить относительную магнитную проницаемость μ этой стали.

Решение. Магнитная постоянная $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ гн/м}$, тогда относительная магнитная проницаемость

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0} = \frac{0,0008792}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} = \frac{879200}{1256} = 700.$$

Как видно из кривых намагничивания (см. рис. 33), способность материалов намагничиваться — их магнитная проницаемость — в слабых магнитных полях велика, а затем с ростом индукции постепенно уменьшается.

Следовательно, магнитная проницаемость ферромагнитных материалов — величина изменяющаяся, зависящая от степени их намагничивания.

Таблица 3

Наибольшая относительная магнитная проницаемость некоторых материалов

Материал	μ	Материал	μ
Кобальт	174	Никель	1120
Сталь трансформаторная	7500	Пермаллой С	115 000

При одной и той же напряженности магнитного поля магнитная индукция в стали больше, чем в чугуне. Это объясняется тем, что магнитная проницаемость стали больше магнитной проницаемости чугуна.

Магнитная индукция прямо пропорциональна напряженности поля H и абсолютной магнитной проницаемости μ_a намагничиваемого материала:

$$B = \mu_a H. \quad (33)$$

Пример. Напряженность магнитного поля катушки $H = 750$ а/м, а абсолютная магнитная проницаемость сердечника $\mu_a = 0,0008792$ гн/м. Определить магнитную индукцию сердечника.

Решение. Магнитная индукция $B = \mu_a H = 0,0008792 \cdot 750 = 0,65$ тл. Так как $1 \text{ тл} = 10\,000 \text{ эс}$, то $0,65 \text{ тл} = 6500 \text{ эс}$.

§ 40. ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ СТАЛИ. КОЭРЦИТИВНАЯ СИЛА.

Катушка (рис. 34), имеющая тороидальный сердечник, подключена через двойной переключатель Π к источнику постоянного тока. Для изменения тока, протекающего по катушке, в цепь включен реостат P , а для измерения тока — амперметр A . Если изменить реостатом силу тока в катушке, то изменится напряженность магнитного поля и магнитная индукция сердечника (см. рис. 34).

С увеличением тока в катушке намагничивание сердечника (магнитная индукция) будет возрастать и при напряженности поля H_1 наступит его магнитное насыщение (точка A). Магнитная индукция достигнет значения B_1 . По мере уменьшения тока сталь будет размагничиваться, так как при снижении напряженности магнитного поля магнитная индукция уменьшается. Однако уменьшение магнитной индукции будет происходить не по кривой начального намагничивания OA , а по другой кривой AB , расположенной выше OA .

Когда сила тока, уменьшаясь, станет равной нулю, намагничивающее поле катушки также будет равно нулю; магнитная же индукция в сердечнике еще не достигнет нуля, а сохранит некоторое значение, определяемое отрезком OB . Этот отрезок характеризует величину остаточной магнитной индукции $B_{ост}$.

Сохранение намагниченности материалом при отсутствии внешнего магнитного поля называется *остаточным магнетизмом*.

Чтобы полностью размагнитить стальной сердечник, необходимо создать магнитное поле противоположного направления. Для этого по обмотке тороида пропускают ток в противоположном направлении (поставив переключатель Π в положение 2—2).

С увеличением тока, протекающего в противоположном направлении, напряженность поля отрицательного направления будет возрастать и при значении напряженности, равном отрезку OC , оста-

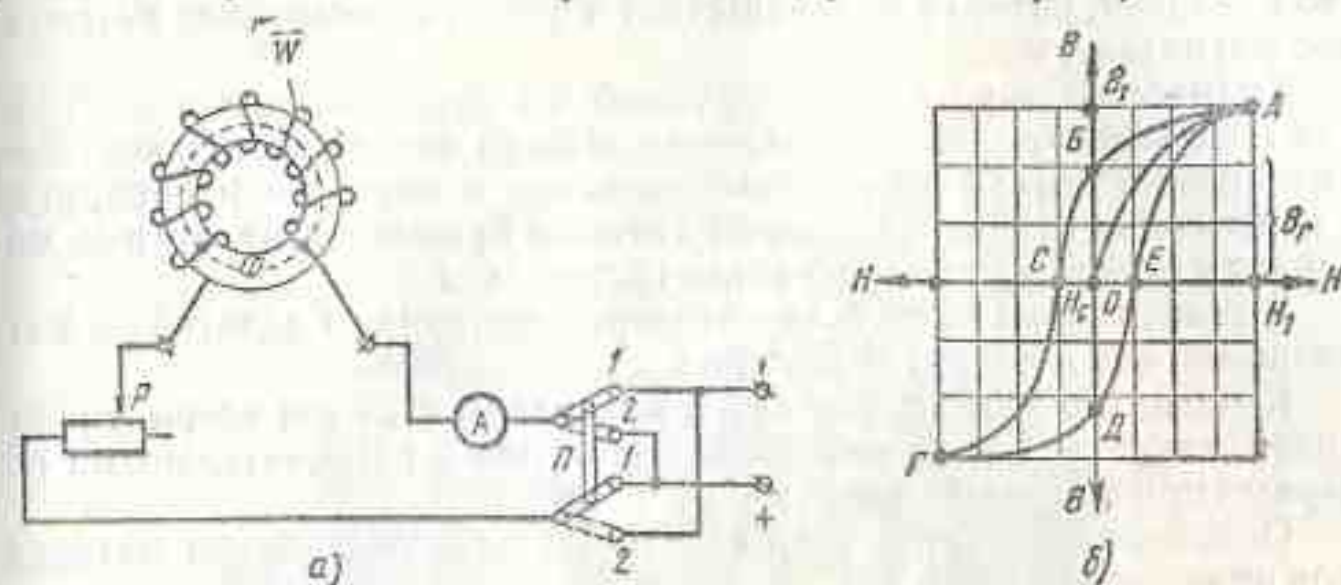


Рис. 34. Схема перемагничивания стали (а) и петли гистерезиса (б)

точная магнитная индукция B станет равной нулю, а сердечник окажется полностью размагниченным.

Явление отставания изменений магнитной индукции ферромагнитного материала при перемагничивании от изменения напряженности поля называется гистерезисом*.

Отрезок OC характеризует сопротивляемость стали размагничиванию и называется *коэрцитивной* (задерживающей) силой (H_c) намагниченного материала.

При дальнейшем увеличении тока в катушке напряженность поля будет возрастать и вновь наступит магнитное насыщение сердечника (точка G).

Уменьшение тока в катушке будет размагничивать сердечник, и при $H = 0$ остаточная индукция (остаточный магнетизм) станет равной отрезку OD .

При повторном изменении направления тока (для этого переключатель Π следует перевести в положение 1—1) и его увеличении сердечник снова размагнитится.

Напряженность поля будет равна отрезку OE . В случае дальнейшего увеличения тока, а следовательно, и напряженности поля магнитная индукция вновь достигнет значения, соответствующего точке A на первоначальной кривой намагничивания.

* Гистерезис — греческое слово, означающее запаздывание.

Повторение процесса перемагничивания стали происходит по замкнутой кривой *АВСДЕ*, которая называется циклической кривой намагничивания или петлей гистерезиса (рис. 34, б).

§ 41. ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ НА ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ

Многие детали электрических машин и трансформаторов (см. гл. VII, VIII, IX и X) подвергаются перемагничиванию.

Перемагничивание материала связано с потерями электрической энергии, которая превращается в тепло, вызывающее нагревание магнитных материалов.

Количество энергии, расходуемой на перемагничивание стали (на гистерезис), пропорционально площади петли гистерезиса. Для уменьшения потерь на перемагничивание в машинах и аппаратах с переменным намагничиванием выгодно применять магнитные материалы с малой площадью петли гистерезиса.

В зависимости от свойств магнитные материалы делятся на магнитно-мягкие и магнитно-жесткие.

К магнитно-мягким относятся материалы с малой коэрцитивной силой, высокой магнитной проницаемостью и незначительными потерями при перемагничивании.

Основные характеристики некоторых магнитно-мягких материалов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Характеристика магнитно-мягких материалов

Наименование материала	Начальная магнитная проницаемость	Максимальная магнитная проницаемость	Коэрцитивная сила, э
Железо	200	5000	1,0
Кремнистое железо	450	8000	0,6
Сплав 1040	40 000	100 000	0,02
Супермаллой	100 000	900 000	0,004

К магнитно-жестким материалам относятся ферромагнитные сплавы, обладающие большой коэрцитивной силой и остаточной индукцией. Они используются для изготовления постоянных магнитов, которые применяют в электроизмерительных приборах, микрофонах и многих других устройствах. В настоящее время для изготовления постоянных магнитов преимущественно применяют сплавы железа с никелем, никель-алюминиевые сплавы (сплавы альни, альнико и магнико), а также кобальтовую сталь.

§ 42. ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Если в соленоид поместить стальной сердечник и пропустить по его виткам электрический ток, то сердечник намагничивается и приобретает магнитные свойства, которыми обладает постоянный магнит.

Соленоид со стальным сердечником называется *электромагнитом*. При размыкании цепи обмотки электромагнита его стальной сердечник размагничивается.

Магнитное поле электромагнита во много раз сильнее поля соленоида. Это объясняется тем, что намагниченный сердечник из ферромагнитного материала создает свое магнитное поле, которое, складываясь с магнитным полем соленоида, значительно увеличивает общее магнитное поле, образуемое током.

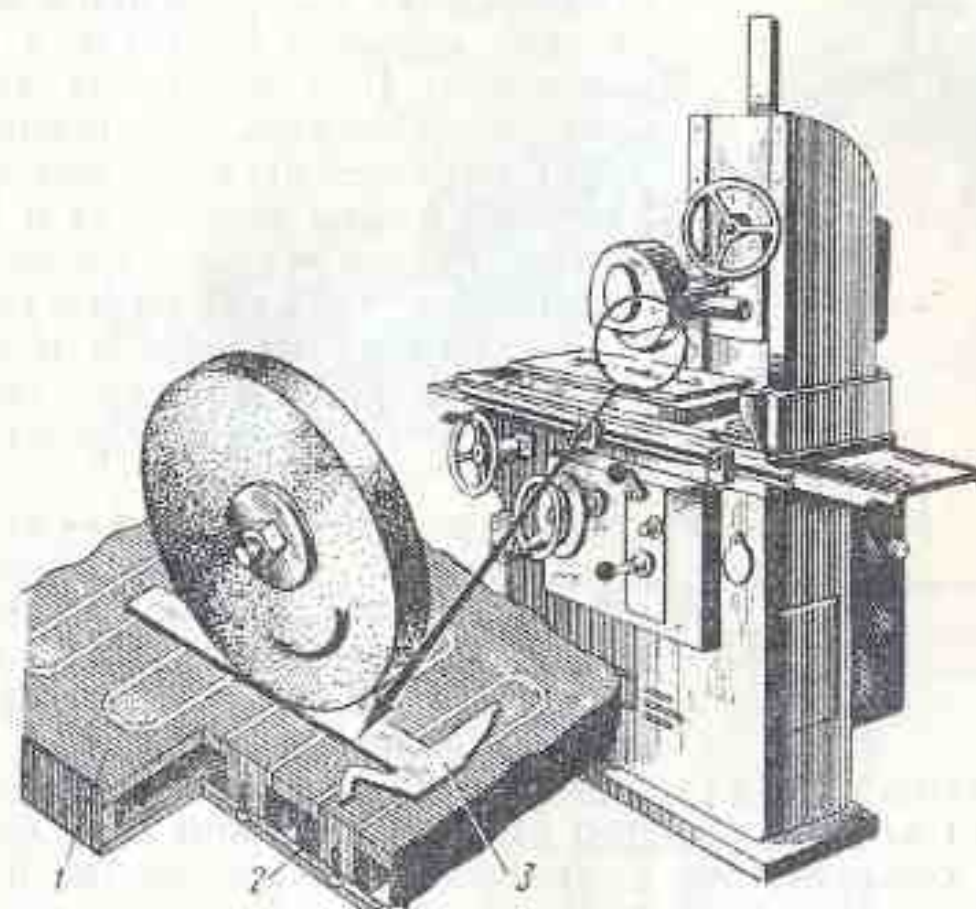


Рис. 35. Плоскошлифовальный станок с электромагнитной плитой:
1 — электромагнит, 2 — обмотка электромагнита, 3 — обрабатываемая деталь

Для определения направления магнитных линий поля электромагнита пользуются правилом буравчика. Практически для определения полюсов электромагнита применяют магнитную стрелку.

Мощные электромагниты, подвешенные к подъемным кранам, служат для переноса изделий из стали и ее сплавов. Электромагниты применяют на станочном оборудовании, в электродвигателях и во многих других устройствах. На сверлильных и плоскошлифовальных станках используют электромагнитные плиты (рис. 35). В такой плите помещается электромагнит, подключаемый к источнику постоянного тока. Электромагнит удерживает обрабатываемое ферромагнитное изделие на станке. После обработки детали выключают ток и снимают изделие со станка.

На использовании электромагнита основано действие электромагнитного пресса, значительно повышающего производительность

труда при штамповке изделий. Пресс (рис. 36) состоит из электромагнита 1, укрепленного на корпусе 4, подвижного якоря 3, ползуна 2 и возвратной пружины. При прохождении тока по обмотке электромагнита якорь преодолевает сопротивление возвратной пружины и притягивается к электромагниту. При этом приходит в движение ползун 5, совершающий ударное действие на обрабатываемый прессом материал 6.

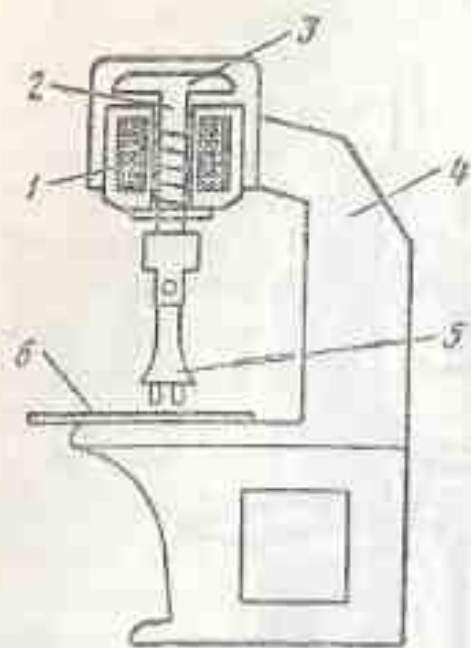


Рис. 36. Устройство электромагнитного пресса

При выключении электромагнита якорь вместе с ползуном при помощи спиральной пружины приходит в исходное положение. При повторном замыкании цепи электромагнита пресс произведет вырубку очередной детали. Установив определенный режим замыкания и размыкания электромагнита пресса, процесс штамповки может быть автоматизирован.

Электромагниты широко применяют в реле и искателях, которые получили большое распространение в устройствах автоматики.

Электромагнитное реле — это прибор, приводимый в действие небольшим электрическим током. Реле при срабатывании замыкает и размыкает своими контактными пружинами электрические цепи относительно большой мощности.

Электромагнитные реле делятся на простые и поляризованные. Основными частями простого электромагнитного реле (рис. 37, а) являются электромагнит с сердечником, якорь, мостик и контактные пружины. При прохождении электрического тока через обмотку 1 стальной сердечник 2 намагничивается и притягивает к себе якорь 3. Последний своим мостиком 4 действует на контактные пружины 5, к которым подключаются провода от управляемых электрических цепей. Если ток в обмотке выключить, сердечник размагничивается и якорь приходит в первоначальное положение. Контакты реле при этом вновь переключаются. Так как реле может иметь несколько пар контактных пружин, то оно (при срабатывании) одновременно может управлять несколькими различными объектами, присоединенными к контактам.

Рассмотрим схему применения простого электромагнитного реле (рис. 37, б) для автоматической сигнализации о ходе того или иного производственного процесса.

В цепи обмотки реле P находится батарея B и кнопка K_m . Цепь контактов K_1 и K_2 , в которую включена сигнальная лампа, в спокойном положении замкнута, и лампа горит.

Цепь контактов K_3 и K_4 , к которой подсоединен электрический звонок $Зв$, в спокойном положении разомкнута. Когда кнопка разомкнута, сигнальная лампа горит, указывая на то, что производственный процесс протекает нормально.

При нарушении производственного процесса специальное устройство замкнет кнопку и по обмотке реле P потечет ток. В результате этого якорь реле притянется к сердечнику и переключит контактные пружины реле. Контакты K_1 и K_2 разомкнутся и сигнальная лампа погаснет, а контакты K_3 и K_4 цепи звонка замкнутся и зазвонит звонок. Это укажет обслуживающему персоналу, что производственный процесс нарушен. После устранения причины, нарушивших ход процесса, кнопка K_m разомкнется и разорвет цепь об-

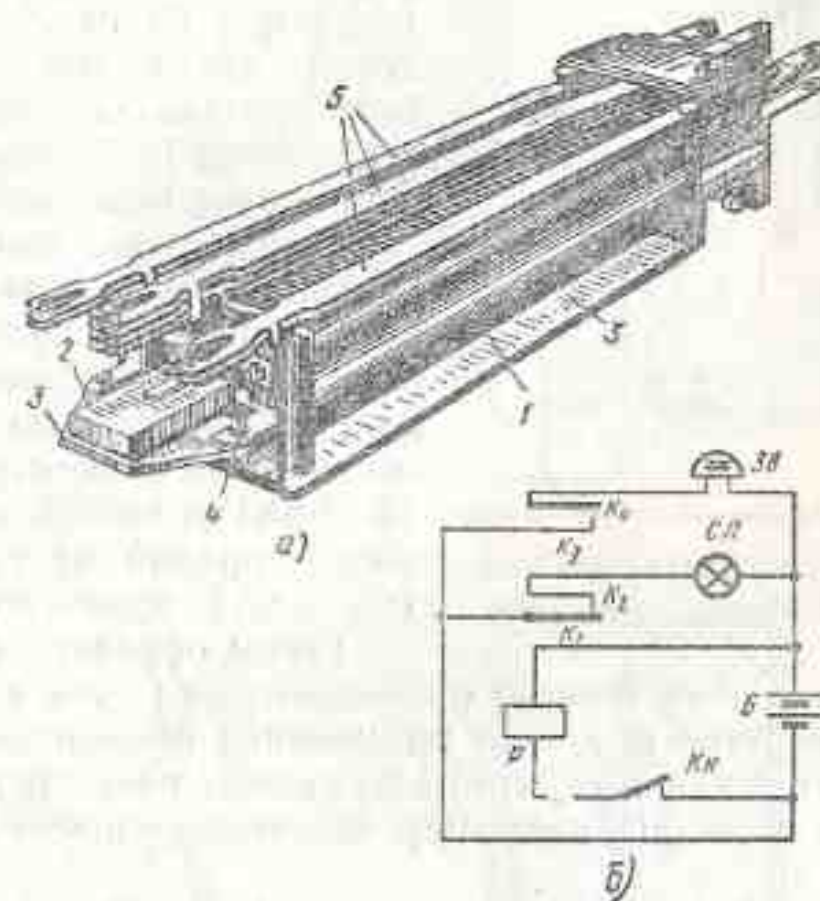


Рис. 37. Простое электромагнитное реле:
а — устройство, б — схема включения для автоматической сигнализации

мотки реле. При этом якорь отойдет от сердечника реле, а контакты цепи звонка разомкнутся и звонок перестанет звонить.

Поляризованное электромагнитное реле состоит из электромагнита и постоянного магнита. В таком реле образуется два магнитных потока. Один из них — рабочий — создается электромагнитом, а другой — вспомогательный — постоянным магнитом. Основными частями поляризованного реле (рис. 38) являются постоянный магнит 1, намагничивающие катушки 2 (электромагниты), стальной сердечник 5, якорь 4, помещенный на оси 3, и контактные винты 6, между которыми перемещается якорь с контактами 7.

Магнитный поток магнита разветвляется на два потока Φ_1 и Φ_2 и намагничивает концы сердечника (одноименная полярность).

При отсутствии тока (сигнала управления) в обмотке 2 реле якорь 4 находится в одном из крайних положений и замыкает один из контактных винтов 6. В таком состоянии якорь удерживается сердечником силой притяжения магнитного потока постоянного

магнита. Допустим, что якорь находится у левого контакта. Для перемещения якоря в правое положение необходимо по обмотке реле пропустить ток (сигнал управления) в таком направлении, чтобы созданный ток, протекающим по правой обмотке, магнитный поток Φ складывался с магнитным потоком Φ_1 , а магнитное поле левой катушки вычиталось из магнитного потока Φ_2 и ослабило его.

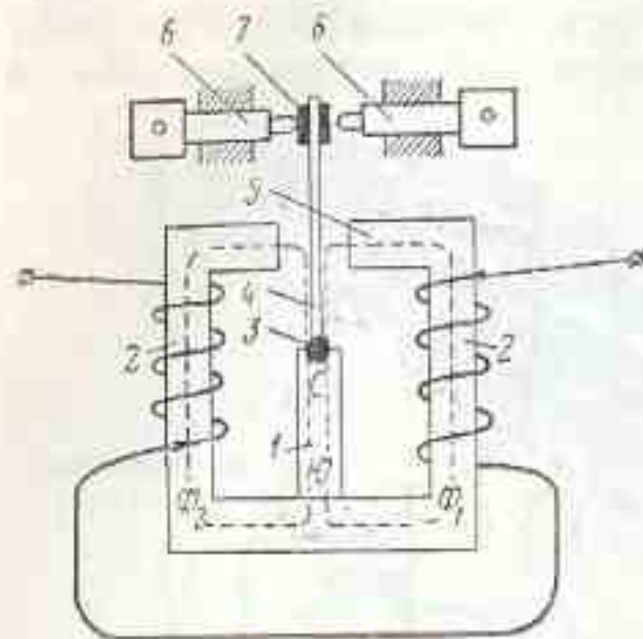


Рис. 38. Устройство поляризованного реле

В этом случае величина правой части магнитного потока ($\Phi_3 + \Phi_1$) будет больше потока левой части ($\Phi_3 - \Phi_2$); якорь реле притянется к правому концу сердечника и быстро переместится в правое положение.

Чтобы якорь оказался в первоначальном положении (левом), необходимо пропустить по его обмотке ток в противоположном направлении. Тогда намагниченность левой части сердечника реле ($\Phi_3 + \Phi_2$) усилится, а намагниченность правой части сердечника ($\Phi_3 - \Phi_1$) ослабится.

Таким образом, срабатывание поляризованного реле зависит от направления тока в его обмотке.

На этом свойстве основано применение поляризованного реле. Оно используется для того, чтобы по одному проводу передавались две различные команды, например «включено» и «выключено» или «да» и «нет» и др.

Для работы реле требуется весьма небольшой ток, а время срабатывания его очень мало.

§ 43. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Связь между электрическими и магнитными явлениями подтверждается тем, что при движении проводника (витка) в магнитном поле или при изменении магнитного потока вокруг него в проводнике (витке) индуцируется (наводится) электродвижущая сила. Под действием индуцированной э. д. с. в замкнутом проводнике возникает электрический ток. Возникновение э. д. с. индукции можно проследить на следующем опыте.

Между полюсами магнита будем перемещать проводник AB , пересекая магнитные линии (рис. 39, а). Стрелка электроизмерительного прибора, присоединенного к этому проводнику, отклонится. Если проводник остановить между полюсами магнита или перемещать его вдоль магнитных линий, то стрелка прибора не отклонится. Из этого опыта следует, что при пересечении проводником магнитных линий в нем индуцируется э. д. с. индукции.

Прделаем еще один опыт. Поместим магнит в проволоочную катушку и присоединим к ней гальванометр (рис. 39, б). Если быстро вынуть магнит из катушки, то стрелка прибора отклонится и затем станет в исходное положение. Если также быстро вставить магнит в катушку, то стрелка прибора вновь отклонится, но в противоположном направлении. Следовательно, и в случае перемещения магнита относительно проводника в последнем возникает э. д. с. индукции.

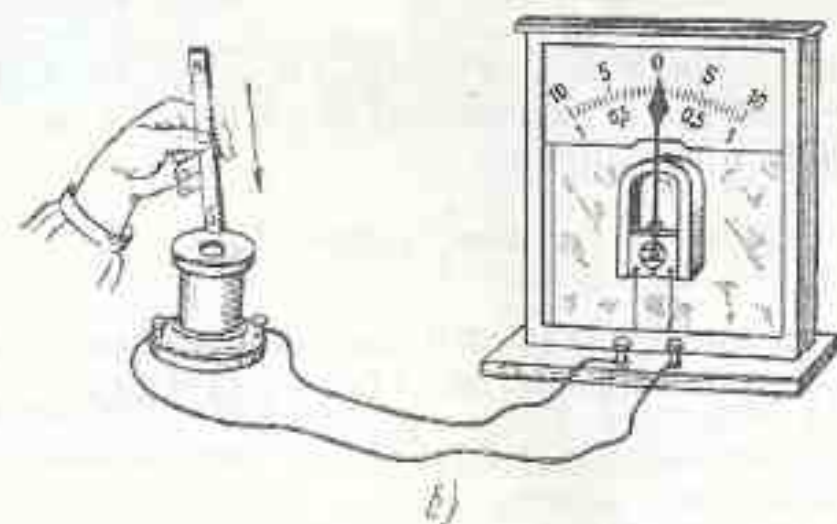
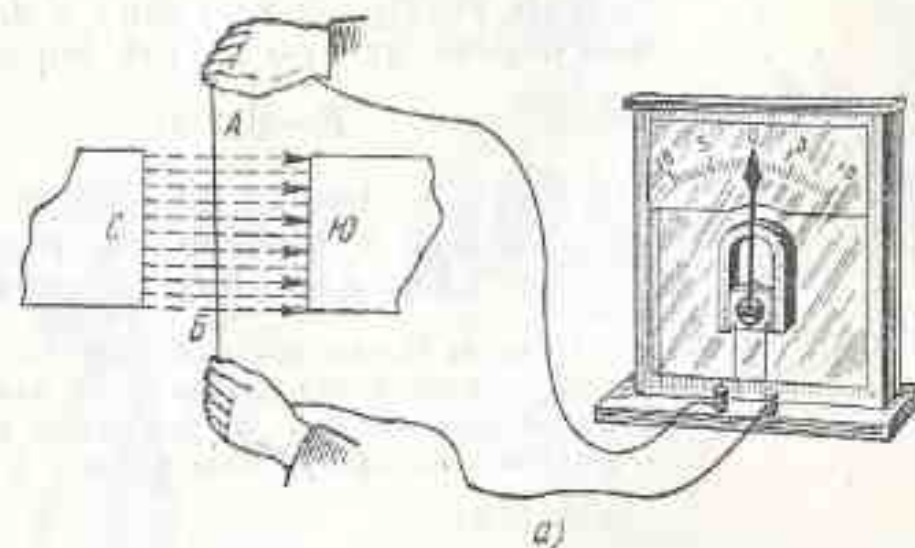


Рис. 39. Возникновение э. д. с. индукции: а — при пересечении проводником магнитных линий, б — при перемещении магнита в катушке

Направление э. д. с. индукции можно определить по правилу правой руки (рис. 40), которое заключается в следующем: если ладонь правой руки расположить так, чтобы магнитные линии входили в нее, а большой палец указывал направление движения проводника в магнитном поле, то вытянутые четыре пальца укажут направление индуцированной э. д. с.

Величина индуцированной э. д. с., возникающей в проводнике при пересечении им магнитных линий, зависит от магнитной индукции B , рабочей длины l проводника и скорости его движения в магнитном поле. Эту зависимость можно выразить формулой

$$E = Blv, \quad (34)$$

где E — э. д. с. индукции, v ,
 B — магнитная индукция, тл,
 l — длина проводника, м,
 v — скорость движения проводника в магнитном поле м/сек.

Эта формула справедлива для случая, когда проводник пересекает магнитные линии под прямым углом. Если проводник пересекает магнитный поток под каким-либо другим углом, то величину э. д. с. индукции определяют по другой формуле:

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

где α — угол между направлением движения проводника и направлением магнитного потока.

Пример. Магнитная индукция $B=2$ тл. Проводник длиной $l=0,4$ м движется под углом 90° к магнитным линиям со скоростью $v=15$ м/сек. Определить индуцируемую в нем э. д. с.

Решение.

$$E = Blv = 2 \cdot 0,4 \cdot 15 = 12 \text{ в.}$$

Рис. 40. Правило правой руки

В простейшем случае, когда $\alpha=90^\circ$ и проводник движется с равномерной скоростью в равномерном магнитном поле, то скорость перемещения проводника

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}, \quad (35)$$

где Δx — отрезок пути, пройденного проводником за время Δt .

Следовательно, электродвижущая сила индукции

$$E = Bl \frac{\Delta x}{\Delta t}.$$

Так как $l \Delta x = \Delta S$ — площадь, которую пересекает проводник, за время Δt , а $B \Delta S = \Delta \Phi$ — магнитный поток, который этот проводник пересекает за отрезок времени Δt , то электродвижущая сила индукции в проводнике

$$E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}. \quad (36)$$

Таким образом, электродвижущая сила, индуцируемая в проводнике, равна отношению магнитного потока $\Delta \Phi$, пересеченного проводником, к времени Δt , за которое произошло это пересечение.

Следует иметь в виду, что величина э. д. с. индукции не зависит от того, движется ли проводник по отношению к магнитному полю или магнитное поле перемещается по отношению к проводнику. Выражение э. д. с. индукции (36) используется широко для рассмотрения электромагнитных явлений. Действие ряда электрических

машин и приборов основано на использовании явления электромагнитной индукции, которое было открыто Фарадеем. К таким машинам относятся генераторы, трансформаторы, электродинамические микрофоны, звукосниматели и др.

Электродинамический микрофон (рис. 41, а) состоит из сильного постоянного магнита 1, мембраны 2 из алюминиевой фольги и подвижной катушки 3. Концы обмотки катушки подключены к пер-

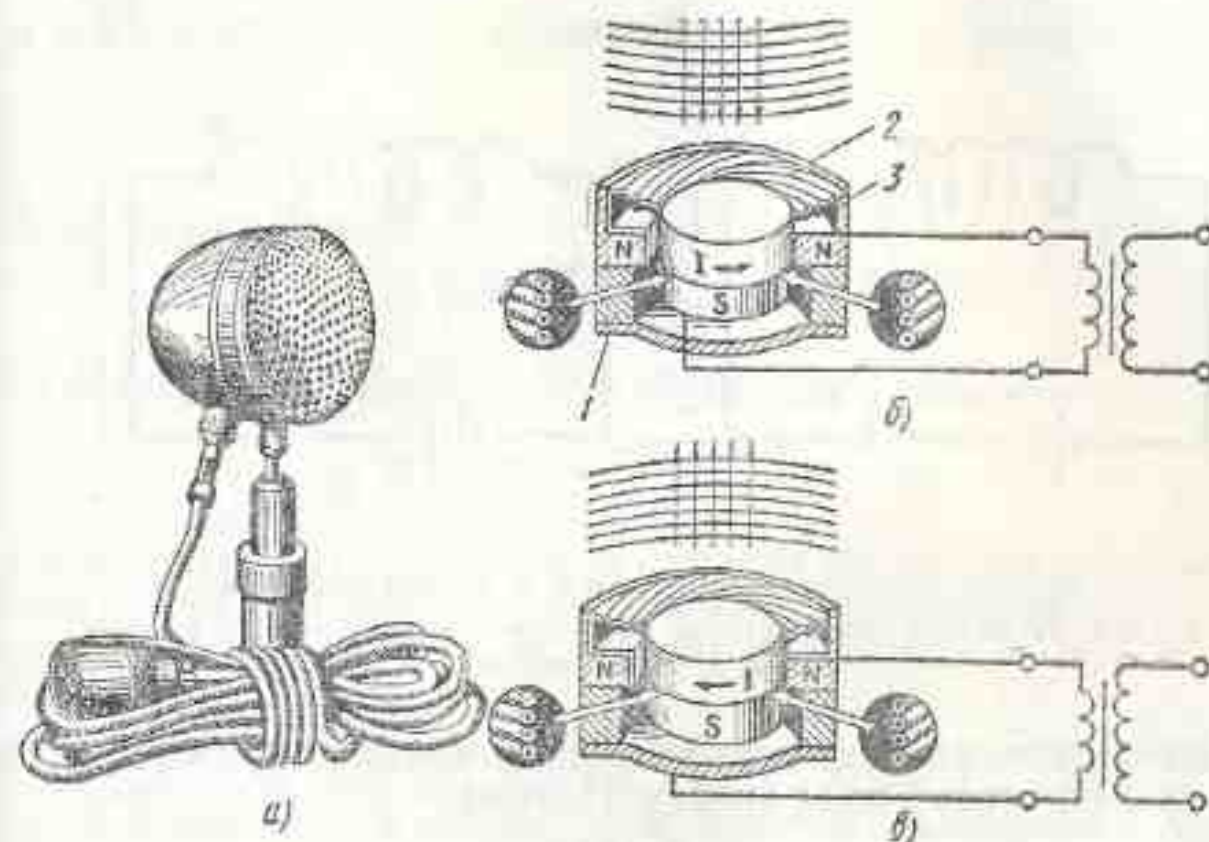


Рис. 41. Электродинамический микрофон:
 а — общий вид, б и в — принцип действия

вичной обмотке трансформатора. Когда звуковые волны попадают на мембрану микрофона (рис. 41, б), она вместе с подвижной катушкой перемещается вниз и вследствие пересечения магнитных линий в катушке индуцируется э. д. с. Под действием э. д. с. по первичной обмотке трансформатора протекает ток.

При разрежении пространства вокруг мембраны (рис. 41, в) она вместе с подвижной катушкой перемещается вверх, при этом в катушке также индуцируется э. д. с., которая создает ток, протекающий в противоположном направлении. Возникающий в обмотке микрофона ток, изменяющийся по величине и направлению, пройдя через усилитель, поступает в громкоговоритель.

§ 44. САМОИНДУКЦИЯ, ИНДУКТИВНОСТЬ

Если замыкать и размыкать цепь тока катушки (рис. 42), то вокруг нее будет появляться и исчезать магнитное поле. Изменяющееся магнитное поле пересекает витки самой катушки и создает в ней э. д. с. самоиндукции. При всяком изменении собственного

магнитного поля катушки ее витки пересекаются собственными магнитными линиями и в ней возникает э. д. с. самоиндукции.

Если по катушке с числом витков W протекает изменяющийся ток I , то он создает магнитный поток Φ , пересекающий ее витки.

Произведение магнитного потока на число витков называется **потокосцеплением** и обозначается буквой ψ (пси):

$$\psi = \Phi W. \quad (37)$$

Потокосцепление ψ , как и магнитный поток Φ , измеряется в веберах (вб).

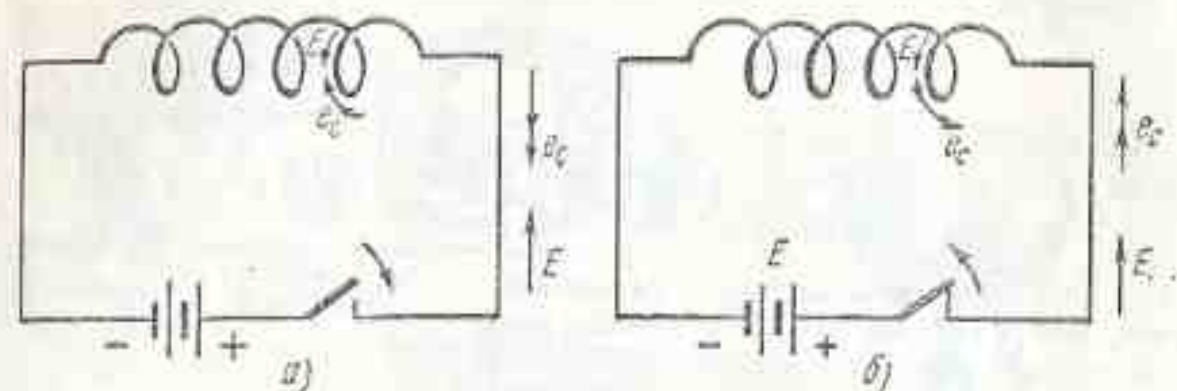


Рис. 42. Схема возникновения э. д. с. самоиндукции:
а — при замыкании цепи; б — при размыкании цепи; E — э. д. с.; ϵ_c — э. д. с. самоиндукции

Потокосцепление в рассматриваемой катушке пропорционально току, протекающему по ее виткам. Поэтому

$$\psi = LI, \quad (38)$$

где L — коэффициент пропорциональности, называемый индуктивностью.

Из формулы (38) следует, что индуктивность определяется отношением потокосцепления к силе тока в катушке и характеризует способность катушки возбуждать э. д. с. самоиндукции (потокосцепление).

$$L = \frac{\psi}{I}.$$

Индуктивность измеряется в генри (гн); $1 \text{ гн} = 1 \text{ ом} \cdot \text{сек}$.

Если при равномерном изменении тока в проводнике на 1 а в 1 сек наводится э. д. с. самоиндукции, равная 1 а , то такой проводник обладает индуктивностью в 1 гн . Более мелкая единица измерения индуктивности называется миллигенри (мгн); $1 \text{ гн} = 1000 \text{ мгн}$. Единица измерения индуктивности, которая в миллион раз меньше генри, называется микрогенри (мкгн); $1 \text{ гн} = 1000000 \text{ мкгн} = 10^6 \text{ мкгн}$; $1 \text{ мгн} = 1000 \text{ мкгн}$.

Определим индуктивность катушки длиной l , имеющей W витков, расположенных в одном слое, по которым протекает ток I (длина катушки больше диаметра в 10 раз и более).

Протекающий по виткам катушки ток возбуждает магнитное поле, напряженность которого

$$H = \frac{IW}{l}, \quad (39)$$

а магнитная индукция

$$B = \mu_0 H \text{ или } B = \frac{\mu_0 IW}{l}.$$

Магнитный поток, создаваемый током,

$$\Phi = BS \text{ или } \Phi = \frac{\mu_0 IW S}{l},$$

а потокосцепление

$$\psi = \Phi W.$$

Так как индуктивность

$$L = \frac{\psi}{I}, \text{ то } L = \frac{\Phi W}{I} \text{ или } L = \frac{\mu_0 IW S W}{l}. \quad (40)$$

Преобразуя выражение (40), получим индуктивность:

$$L = \frac{W^2 \mu_0 S}{l}. \quad (41)$$

Таким образом, индуктивность катушки прямо пропорциональна квадрату числа ее витков, магнитной проницаемости материала сердечника катушки, площади сечения ее каркаса и обратно пропорциональна длине катушки.

Пример. На цилиндр каркаса без сердечника намотано в один слой 500 витков проволоки. Длина каркаса катушки $l = 0,24 \text{ м}$, а ее диаметр $d = 0,02 \text{ м}$. Определить индуктивность этой катушки, если магнитная проницаемость воздуха, окружающего катушку, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ гн/м}$.

Решение. Площадь сечения катушки

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,02 \cdot 0,02}{4} = 0,0003 \text{ м}^2.$$

Индуктивность катушки

$$L = \frac{W^2 \mu_0 S}{l} = \frac{500 \cdot 500 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 0,0003}{0,24 \cdot 10^7} = 0,0039 \text{ гн, или } 3,9 \text{ мгн}.$$

Различные проволочные катушки (обмотки) обладают разной индуктивностью. Катушка со стальным сердечником имеет значительно большую индуктивность, чем катушка без сердечника. Если принять индуктивность проволочной катушки без сердечника за единицу, то у катушки со стальным сердечником индуктивность будет больше примерно в 3500 раз. Это объясняется тем, что при внесении стального сердечника в катушку, по которой протекает ток, происходит намагничивание сердечника, в результате этого значительно увеличивается магнитный поток, пересекающий витки катушки, и возрастает потокосцепление. Поскольку относительная магнитная проницаемость стального сердечника примерно в 3500 раз больше, чем воздуха, индуктивность катушки при внесении сердечника увеличивается во столько же раз. Но эта индуктивность непостоянна, так как μ_0 стали зависит от напряженности поля H , а следовательно, и от силы тока в обмотке.

Индуктивность катушки обусловлена также ее сечением и длиной. Чем больше сечение, тем больше индуктивность. С увеличением длины катушки при неизменном числе витков индуктивность уменьшается.

§ 45. ВЕЛИЧИНА И НАПРАВЛЕНИЕ Э. Д. С. САМОИНДУКЦИИ

Величина возникающей в катушке э. д. с. самоиндукции прямо пропорциональна ее индуктивности и зависит от скорости изменения магнитного потока.

Если в цепи, обладающей индуктивностью L гн, ток изменяется за малое время Δt сек на малую величину ΔI а, то в такой цепи возникает э. д. с. самоиндукции e_c , измеряемая в вольтах.

$$e_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (42)$$

Знак минус в этой формуле указывает на то, что э. д. с. самоиндукции противодействует изменению тока в ней.

Пример. В катушке, обладающей индуктивностью $L=5$ гн, протекает электрический ток, сила которого изменяется за 2 сек на 10 а. Вычислить, какая э. д. с. самоиндукции возникает в катушке.

Решение.

$$e_c = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 5 \frac{10}{2} = 25 \text{ в.}$$

Русский ученый Э. Х. Ленц доказал, что э. д. с. индукции, в том числе э. д. с. самоиндукции, всегда направлена так, что она противодействует причине, вызывающей ее. Это определение называется **правилом Ленца**.

Если при замыкании цепи э. д. с. батареи направлена, как показано стрелкой на рис. 42, а, то э. д. с. самоиндукции, согласно правилу Ленца, в этот момент будет иметь противоположное направление (показано двойной стрелкой), препятствуя нарастанию тока. В момент размыкания цепи (рис. 42, б), наоборот, э. д. с. самоиндукции будет иметь направление, совпадающее с э. д. с. батареи, препятствуя убыванию тока.

Следовательно, в момент замыкания цепи, обладающей индуктивностью, э. д. с. на зажимах цепи уменьшается на величину возникающей э. д. с. самоиндукции.

Обозначив напряжение источника тока U , величину э. д. с. самоиндукции e_c , а результирующее напряжение U_p , получим:

$$U_p = U - e_c \quad (43)$$

В момент размыкания цепи результирующее напряжение увеличивается:

$$U_p = U + e_c \quad (44)$$

Э. д. с. самоиндукции в электрических цепях может во много раз превосходить напряжение источника тока. В связи с этим при размыкании цепей, обладающих большой индуктивностью, проис-

ходит пробой воздушного промежутка между контактами рубильников и выключателей и образуется искра или дуга, от которой контакты обгорают и частично расплавляются. Кроме того, э. д. с. самоиндукции может пробить изоляцию проводов катушки.

Для наблюдения возникновения э. д. с. и тока самоиндукции в момент размыкания цепи выполним такой опыт (рис. 43).

При замыкании цепи ток в точке A разветвляется. Одна его часть пройдет по виткам катушки в лампу L_1 , а другая часть — через реостат в лампу L_2 . При этом лампа L_2 мгновенно вспыхнет, тогда как нить лампы L_1 накалится постепенно. При размыкании цепи лампа L_2 сразу погаснет, а лампа L_1 на мгновение ярко вспыхнет и затем погаснет. Наблюдаемое явление связано с тем, что при замыкании цепи магнитное поле, создаваемое вокруг катушки L , пересекает «собственные витки» и возбуждает в ней э. д. с. и ток самоиндукции, который препятствует прохождению основного тока. По этой причине нить лампы L_1 накаливается при замыкании цепи медленнее нити лампы L_2 . При размыкании цепи в катушке также создается э. д. с. и ток самоиндукции, но в данном случае направление э. д. с. самоиндукции совпадает с направлением основного тока. Это и служит причиной того, что нить лампы L_1 на мгновение ярко вспыхивает и гаснет позже лампы L_2 , в цепь которой катушка не включена.

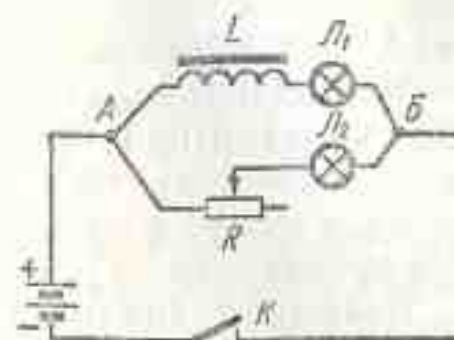


Рис. 43. Схема возникновения э. д. с. и тока самоиндукции при размыкании цепи

§ 46. ВЗАИМОИНДУКЦИЯ

Если две катушки находятся на некотором расстоянии друг от друга и по одной из них K_1 проходит изменяющийся ток, то часть магнитного потока, возбуждаемого этим током, пронизывает (пересекает) витки второй катушки K_2 и в ней возникает э. д. с., называемая э. д. с. **взаимоиндукции** (рис. 44).

Под действием э. д. с. взаимоиндукции в замкнутой цепи второй катушки возникает электрический ток взаимоиндукции. Он вызывает появление магнитного поля, которое пронизывает витки первой катушки, в результате чего в ней также возникает э. д. с. взаимоиндукции. Такое явление называется **взаимоиндукцией**.

Величина э. д. с. взаимоиндукции, возникающей во второй катушке, зависит от раз-

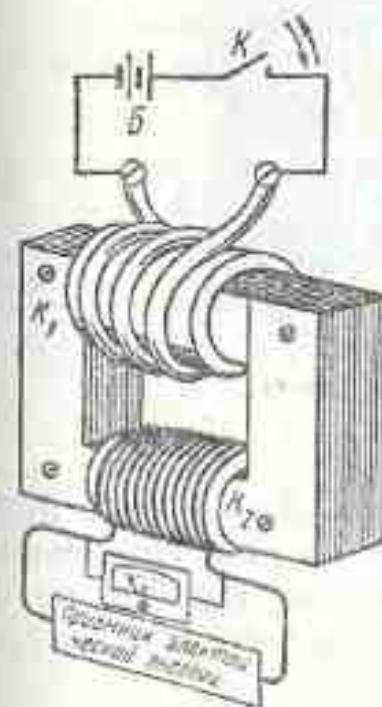


Рис. 44. Схема получения э. д. с. взаимоиндукции

меров, расположения катушек, магнитной проницаемости их сердечника, а также от скорости изменения силы тока $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ в первой катушке. Эту зависимость можно выразить формулой.

$$E_{\text{взаим}} = -M \frac{\Delta I}{\Delta t}, \quad (45)$$

где ΔI — изменение силы тока (a) за время Δt , сек;

M — величина, зависящая от размеров катушек, их расположения и магнитной проницаемости среды между катушками. Она называется взаимной индуктивностью и измеряется в генри (гн).

Знак минус в этой формуле показывает, что э. д. с. взаимной индукции противодействует причине, вызывающей ее.

Взаимной индуктивностью в 1 гн обладают две цепи в том случае, если в одной из них возникает э. д. с. взаимной индукции в 1 в при равномерном изменении тока в другой цепи со скоростью 1 а в 1 сек.

На использовании явления взаимной индукции основано действие трансформаторов.

§ 47. ВИХРЕВЫЕ ТОКИ

Металлический брусок (массивный проводник — стальные и чугунные части электрических машин и трансформаторов), находящийся в изменяющемся магнитном поле, пересекает магнитные линии этого поля и в нем (бруске) индуктируются электрические

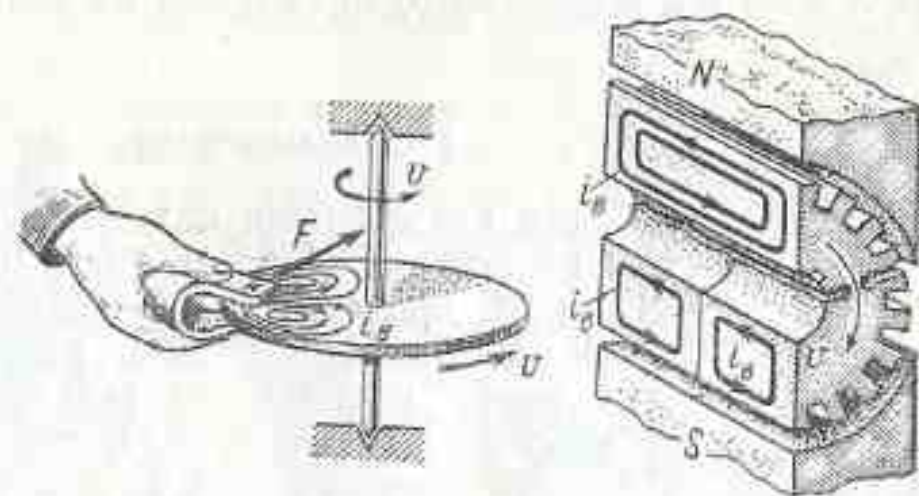


Рис. 45. Схема возникновения вихревых токов

токи, носящие название *вихревых токов*. Чем больше сечение проводников (чем они массивнее), тем меньше их электрическое сопротивление и тем больше вихревые токи в них возникают, которые нагревают эти проводники, вызывая существенные потери электрической энергии.

Вихревые токи $i_{\text{в}}$ образуются в том случае, когда сплошные массы металла вращаются в магнитном поле и пересекают его магнитные линии (рис. 45). Как и всякие индуктированные токи,

вихревые токи, согласно правилу Ленца, противодействуют причине, вызывающей их, в частности ослабляют магнитное поле, возбуждающее их.

В большинстве электрических устройств вихревые токи нежелательны и для их уменьшения увеличивают сопротивление тех проводников, в которых они возникают. Это достигается путем введения в состав материалов специальных примесей. Кроме того, ферромагнитные детали электрических машин, подвергающихся перемагничиванию, изготовляют из листовой стали толщиной 0,35—0,5 мм, изолируя отдельные листы лаком, тонкой бумагой или окатиной.

Однако в некоторых установках и приборах появление вихревых токов желательно. На использовании вихревых токов основана, например, работа индукционных электрических печей для плавки металлов и индукционных электроизмерительных приборов (счетчиков электроэнергии).

Индукционная печь представляет собой тигель, расположенный внутри катушки из трубчатой медной проволоки. В тигель помещают металл. Когда по обмотке печи проходит изменяющийся (переменный) электрический ток, внутри печи создается переменное магнитное поле. Магнитные линии поля индуктируют в металле вихревые токи, вызывающие его нагревание, в результате чего металл расплавляется.

Контрольные вопросы

1. Что называется относительной магнитной проницаемостью?
2. От каких величин зависит напряженность магнитного поля?
3. В каких единицах измеряется магнитная индукция?
4. Как устроен электромагнит?
5. Что называется электромагнитным реле?
6. Назовите правило для определения направления перемещения проводника с током в магнитном поле.
7. При каких условиях в проводнике возникает э. д. с. индукции?
8. От каких величин зависит э. д. с. индукции?
9. При каких условиях возникает в катушке э. д. с. самоиндукции?
10. В каких единицах измеряется индуктивность?
11. При каких условиях возникает э. д. с. взаимной индукции?

ГЛАВА IV
ОДНОФАЗНЫЙ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

§ 48. ПОЛУЧЕНИЕ ПЕРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ

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

Для получения переменного тока используют электромашинные генераторы. Работа генератора переменного тока основана на явлении электромагнитной индукции.

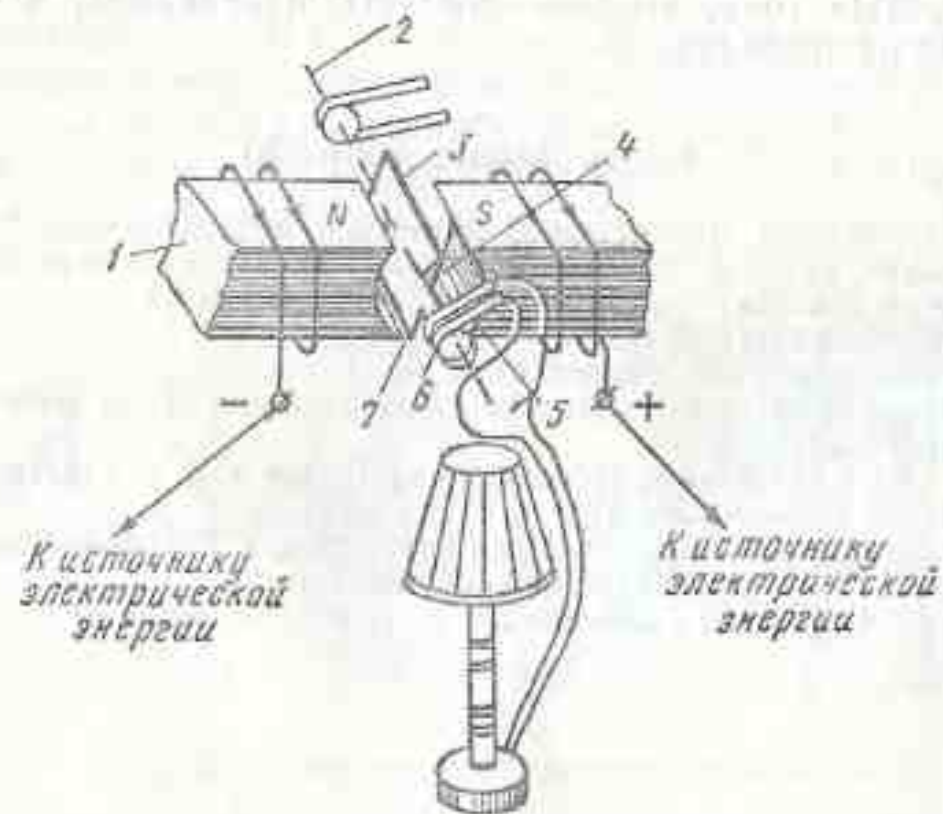


Рис. 46. Схема устройства генератора переменного тока

Рассмотрим принцип работы генератора и выясним при помощи простейшей схемы (рис. 46), как создается переменная э. д. с., под действием которой в электрической цепи протекает переменный ток.

Магнитное поле генератора возбуждается электромагнитом 1, по обмоткам которого протекает постоянный ток от внешнего источ-

ника электрической энергии. В магнитном поле помещен виток 3 медной проволоки, укрепленный на оси 2 и вращаемый вокруг нее каким-либо двигателем. Концы 4 и 7 витка соединены с медными контактными кольцами 6, изолированными от оси. К кольцам прижимаются неподвижные щетки 5, к которым присоединяется приемник электрической энергии.

Известно, что величина индуктированной э. д. с. e , возникающей в проводнике при пересечении им магнитного потока, зависит от магнитной индукции B , рабочей длины l , скорости v движения про-

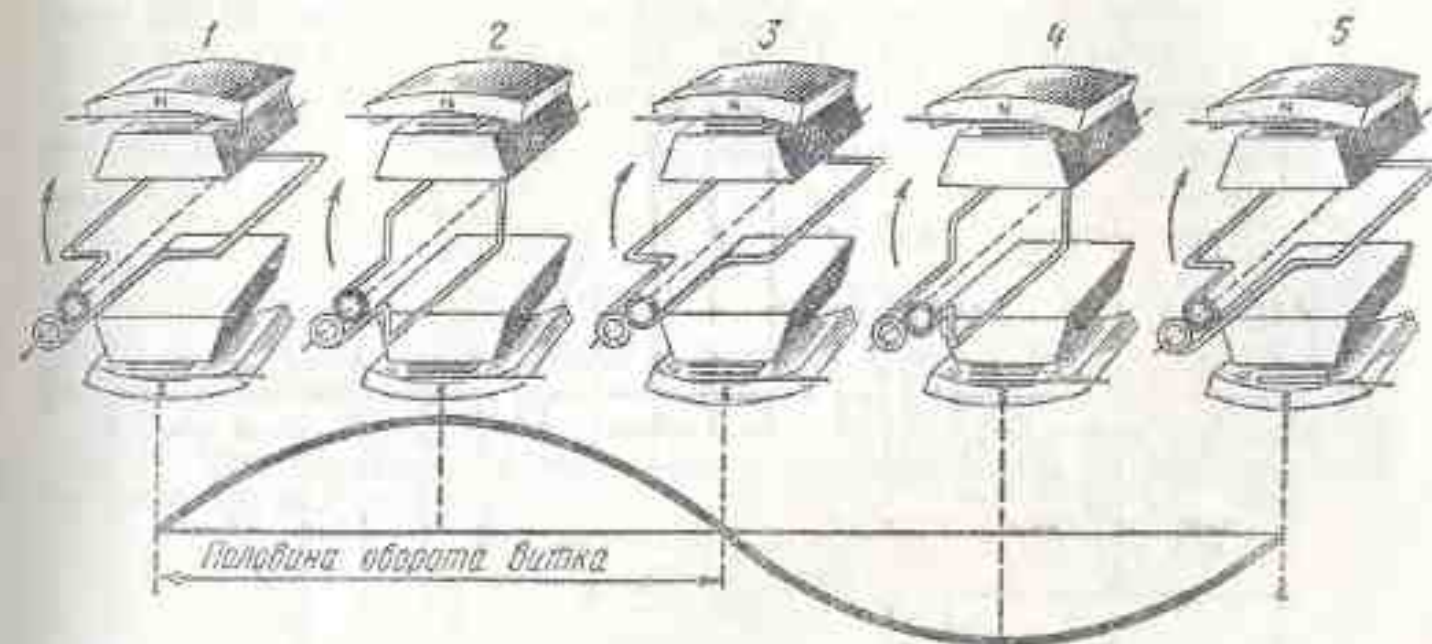


Рис. 47. Схема получения переменной э. д. с.

водника в магнитном поле, синуса угла между направлением движения проводника и направлением магнитного потока:

$$e = Blv \sin \alpha \quad (46)$$

На рис. 47 показаны различные положения витка, вращающегося в однородном магнитном поле генератора с равномерной скоростью. В положении 1 виток перемещается вдоль магнитного потока. Следовательно, виток не пересекает магнитных линий, угол α между направлением движения проводника и магнитным потоком равен нулю, а $\sin 0^\circ = 0$. Поэтому индуктированная в витке электродвижущая сила $e = Blv \sin 0^\circ = 0$.

Виток, вращаясь по окружности, через некоторое время повернется на угол $\alpha = 90^\circ$ и займет положение 2. При этом он пересекает наибольшее количество магнитных линий. Индуктированная в нем электродвижущая сила будет наибольшей, $\sin 90^\circ = 1$ и $e = Blv \sin 90^\circ = Blv$.

Из положения 2 виток, продолжая вращаться, займет положение 3 и будет пересекать магнитный поток под углом $\alpha = 180^\circ$. На пути от 2 до 3 индуктированная электродвижущая сила будет постепенно уменьшаться и в положении 3 станет равной нулю, так как виток не будет пересекать магнитный поток; $\sin 180^\circ = 0$ и $e = Blv \sin 180^\circ = 0$.

Пользуясь правилом правой руки, определим направление электродвижущей силы в витке, когда он перемещается в магнитном поле по окружности от положения 1 до положения 3. Э. д. с. будет направлена от нас за плоскость чертежа. Условимся считать это направление э. д. с. положительным.

Далее виток при своем вращении займет поочередно положения 4, 5 и вновь вернется в положение 1. Электродвижущая сила в витке при этом постепенно увеличится и в положении 4 она станет наибольшей ($\alpha = 270^\circ$), после чего э. д. с. уменьшится и в поло-

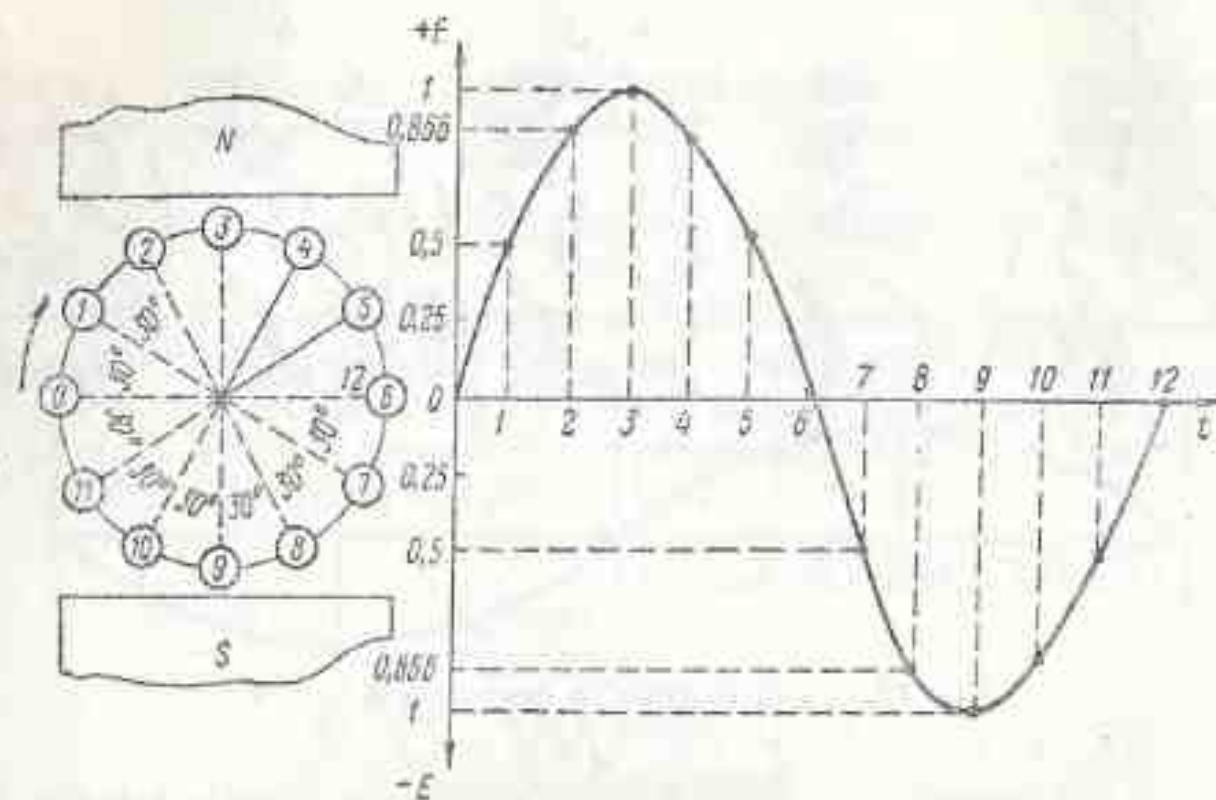


Рис. 48. График изменения переменной э. д. с. в проводнике

жении 5 вновь станет равной нулю ($\sin 360^\circ = 0$). Далее весь процесс изменения э. д. с. повторится.

Пользуясь правилом правой руки, можно убедиться в том, что во вторую половину оборота витка возникающая в нем электродвижущая сила изменит свое направление и будет направлена к нам. Это направление э. д. с. условимся считать отрицательным.

График изменения электродвижущей силы, возникающей в витке в зависимости от угла его поворота в магнитном поле, приведен на рис. 48.

Электродвижущая сила (рис. 48), изменяющаяся по синусоиде, называется *синусоидальной*. Под действием такой э. д. с. в электрических цепях течет синусоидальный переменный ток.

§ 49. ОСНОВНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

Переменная э. д. с., переменное напряжение, а также переменный ток характеризуются периодом, частотой, мгновенным, максимальным и действующим значениями.

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

Если одно полное изменение переменной э. д. с. совершается за $1/50$ сек, то период этой э. д. с. равен $1/50$ сек.

Частота. Число полных изменений переменной э. д. с. (напряжения или тока), совершаемых за одну секунду, называется *частотой*. Частота обозначается буквой f и измеряется в герцах (*гц*). При измерении больших частот пользуются единицами килogerц (*кгц*) и мегагерц (*Мгц*); $1 \text{ кгц} = 1000 \text{ гц}$, $1 \text{ Мгц} = 1000 \text{ кгц}$, $1 \text{ Мгц} = 1\,000\,000 \text{ гц} = 10^6 \text{ гц}$. Чем больше частота переменного тока, тем короче период. Таким образом, частота — величина, обратная периоду.

$$f = \frac{1}{T}. \quad (47)$$

Пример. Длительность одного периода переменного тока равна $1/500$ сек. Определить частоту тока.

Решение. Одно полное изменение переменного тока происходит за $1/500$ сек. Следовательно, за одну секунду совершится 500 таких изменений. На основании этого частота

$$f = \frac{1}{T} = 1 : \frac{1}{500} = 500 \text{ гц}.$$

Чем больше период переменного тока, тем меньше его частота. Таким образом, период является величиной, обратной частоте, т. е.

$$T = \frac{1}{f}. \quad (48)$$

Пример. Частота тока равна 2000 гц (2 кгц). Определить период этого переменного тока.

Решение. За 1 сек происходит 2000 полных изменений переменного тока. Следовательно, одно полное изменение тока — один период совершается за $1/2000$ долю секунды. На основании этого период

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{2000} = 0,0005 \text{ сек}.$$

Угловая частота. При вращении витка в магнитном поле один его оборот соответствует 360° , или 2π радиан*. Если, например, виток за время $T = 3$ сек совершает один оборот, то угловая скорость его вращения за одну секунду

$$\omega = \frac{360^\circ}{T} = \frac{360^\circ}{3 \text{ сек}} = 120 \text{ град/сек}.$$

Соответственно угловая скорость вращения этого витка выражается в *рад/сек* и определяется отношением $\frac{2\pi}{T}$. Эта величина называется *угловой частотой* и обозначается буквой ω .

* $1 \text{ рад} = 57^\circ 17' 44''$; $\pi = 3,14$.

Таким образом,

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ или } \omega = 2\pi \frac{1}{T}. \quad (49)$$

Так как частота переменного тока $f = \frac{1}{T}$, то, подставляя это значение f в выражение угловой частоты, получим:

$$\omega = 2\pi \frac{1}{T} = 2\pi f \text{ рад/сек.} \quad (50)$$

Угловая частота ω , выраженная в рад/сек, больше частоты тока f , выраженной в герцах, в 2π раз.

Если частота переменного тока $f = 50$ гц, то угловая частота $\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314$ рад/сек.

В различных областях техники применяют переменные токи самых разных частот. На электростанциях СССР установлены генераторы, вырабатывающие переменную электродвижущую силу, частота которой $f = 50$ гц. В радиотехнике и электронике используют переменные токи частотой от десятков до многих миллионов герц.

Мгновенное и максимальное значения. Величину переменной электродвижущей силы, силы тока, напряжения и мощности в любой момент времени называют *мгновенными значениями* этих величин и обозначают соответственно строчными буквами (e , i , u , p).

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

На рис. 48 видно, что переменная э. д. с. достигает своего значения два раза за один период.

Действующая величина. Электрический ток, протекающий по проводам, нагревает их независимо от своего направления. В связи с этим тепло выделяется не только в цепях постоянного тока, но и в электрических цепях, по которым протекает переменный ток.

Если по проводнику сопротивлением r ом протекает переменный электрический ток, то в каждую секунду выделяется определенное количество тепла. Это количество тепла прямо пропорционально максимальному значению переменного тока.

Можно подобрать такой постоянный ток, который, протекая по такому же сопротивлению, что и переменный ток, выделял бы равное количество тепла. В этом случае можно сказать, что в среднем действие (эффективность) переменного тока по количеству выделенного тепла равно действию постоянного тока.

Действующим (или эффективным) значением переменного тока называется такая сила постоянного тока, которая, протекая через равное сопротивление и за одно и то же время, что и переменный ток, выделяет одинаковое количество тепла.

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

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

$$I = \frac{I_m}{1,41}; \quad I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; \quad I = I_m \cdot 0,707. \quad (51)$$

Аналогично действующие значения переменной электродвижущей силы и напряжения меньше их максимальных значений тоже в 1,41 раза.

$$E = \frac{E_m}{1,41}; \quad E = E_m \cdot 0,707; \quad U = \frac{U_m}{1,41}; \quad U = U_m \cdot 0,707. \quad (52)$$

По величине измеренных действующих значений силы переменного тока, напряжения или электродвижущей силы можно вычислить их максимальные значения:

$$E_m = E \cdot 1,41; \quad U_m = U \cdot 1,41; \quad I_m = I \cdot 1,41. \quad (53)$$

Пример. Вольтметр, подключенный в зажимах цепи, показывает действующее напряжение $U = 127$ в. Вычислить максимальное значение (амплитуду) этого переменного напряжения.

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

$$U_m = U \cdot \sqrt{2} = 127 \cdot 1,41 = 179,07 \text{ в.}$$

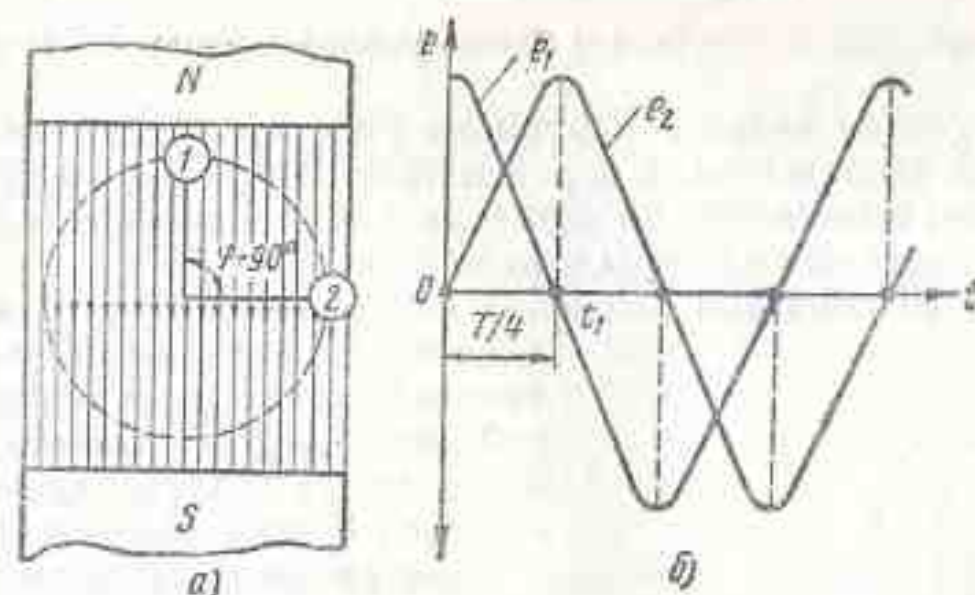


Рис. 49. Схема вращения двух проводников в магнитном поле (а) и диаграмма изменения э. д. с., не совпадающих по фазе (б)

Для характеристики каждой переменной электродвижущей силы, переменного напряжения или переменного тока недостаточно знать период, частоту и максимальное значение.

Фаза. Сдвиг фаз. При сопоставлении двух и более переменных синусоидальных величин (э. д. с., напряжения или тока) необходимо также учитывать, что они могут изменяться во времени неодинаково и достигать своего максимального значения в разные моменты времени. Если в электрической цепи ток изменяется во времени так же, как меняется э. д. с., т. е. когда электродвижущая сила равна нулю и ток в цепи равен нулю, а при увеличении э. д. с. до положитель-

ного максимального значения одновременно увеличивается и достигает положительной максимальной величины и сила тока в цепи, и далее, когда э. д. с. уменьшается до нуля и сила тока одновременно станет равна нулю и т. д., то в такой цепи переменная электродвижущая сила и переменный ток совпадают по фазе.

На рис. 49 показаны моменты вращения двух проводников в магнитном поле и графики изменения э. д. с. в проводах. Провод 1 и провод 2 смещены на угол $\varphi=90^\circ$. При пересечении магнитного потока в каждом из проводов возникает переменная э. д. с. Когда в проводе 2 электродвижущая сила равна нулю, в проводе 1 она будет максимальной. В проводе 2 э. д. с. постепенно увеличивается и достигает максимального значения в момент t_1 , а в проводе 1 индуцируемая э. д. с. постепенно убывает и в этот же момент времени равна нулю. Таким образом, индуцируемые в проводах э. д. с. не совпадают по фазе, а сдвинуты одна относительно другой по фазе на $1/4$ периода или на угол $\varphi=90^\circ$. Кроме того, э. д. с. в проводе 1 раньше достигает максимума, чем э. д. с. в проводе 2, и поэтому считают, что электродвижущая сила e_1 опережает по фазе э. д. с. e_2 , или э. д. с. e_2 отстает по фазе от э. д. с. e_1 . При расчетах цепей переменного тока важное практическое значение имеет сдвиг фаз между переменными напряжением и током.

§ 50. ПОНЯТИЕ О СЛОЖЕНИИ ПЕРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ

При изучении цепей переменного тока приходится складывать переменные напряжения, э. д. с. или токи. При этом следует учитывать, что они изменяются по величине и направлению и, кроме того, могут совпадать или не совпадать по фазе.

На рис. 50 показано сложение двух переменных токов, совпадающих по фазе, но имеющих различное максимальное значение. Суммой этих двух переменных токов, выраженных синусоидами i_1 и i_2 , является третья синусоида тока i_3 .

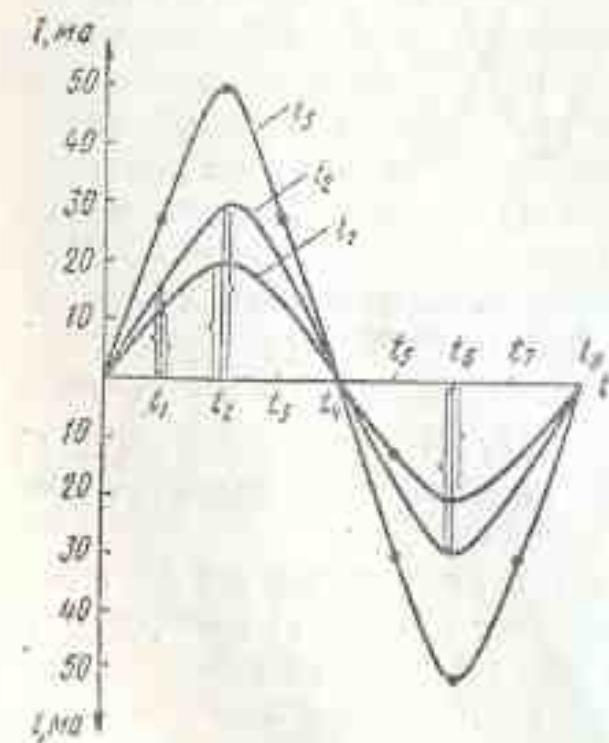


Рис. 50. Сложение двух переменных токов, совпадающих по фазе

Для сложения синусоид следует сложить отрезки, выражающие силу токов i_1 и i_2 в одинаковые моменты времени. В момент t_1 сила тока i_1 равна 12 ма, сила тока i_2 равна 15 ма. Общая сила тока в это мгновение равна:

$$i_1 + i_2 = 12 + 15 = 27 \text{ ма.}$$

В момент времени t_2 сила тока $i_1 = 20$ ма, $i_2 = 30$ ма. Общая сила тока i_3 составляет 50 ма. Подобным образом складывают токи в остальные моменты времени t_3 , t_4 и т. д.

На графике откладывают значе-

ния суммарной силы тока для каждого момента времени, а затем соединяют точки, обозначенные на графике сплошной линией, тогда получают синусоиду i_3 , выражающую сумму двух токов i_1 и i_2 .

Аналогично производят сложение переменных напряжений и токов, не совпадающих по фазе.

§ 51. ПОНЯТИЕ О ВЕКТОРАХ И ВЕКТОРНЫХ ДИАГРАММАХ

При изучении и расчете цепей переменного тока удобно пользоваться векторными диаграммами, на которых синусоидальные э. д. с., напряжения и токи условно изображают с помощью векторов. Применение этих диаграмм упрощает изучение и расчет цепей и вносит наглядность в рассматриваемые соотношения.

Сравнивать можно векторы, которые обладают одной и той же размерностью.

Равенство двух векторов \overline{AB} и \overline{CD} обозначают так: $\overline{AB} = \overline{CD}$. Векторы можно складывать. Суммой двух векторов (рис. 51, а) \overline{AB} и \overline{AD} называется третий вектор \overline{AC} , который служит диагональю

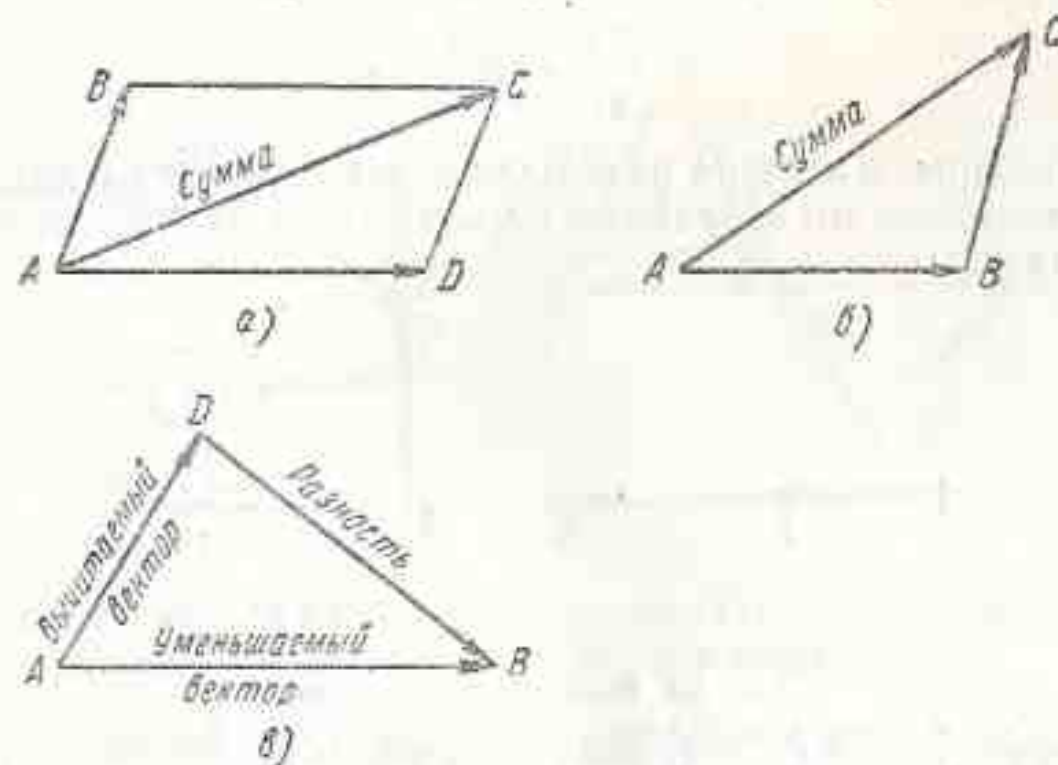


Рис. 51. Сложение (а и б) и вычитание (в) векторов

параллелограмма, сторонами которого являются слагаемые векторы.

Если два вектора \overline{A} и \overline{B} лежат на одной прямой, то сумма таких векторов равна их алгебраической сумме, выраженной вектором \overline{C} . Сумма векторов не зависит от порядка сложения:

$$\overline{A} + \overline{B} + \overline{C} = \overline{C} + \overline{B} + \overline{A}.$$

Сложение векторов можно производить по правилу треугольника.

Для сложения вектора \overline{AB} с вектором \overline{BC} из точки А (рис. 51, б) строят вектор \overline{AB} , из конца этого вектора строят вектор \overline{BC} . Тогда

вектор \overline{AC} , соединяющий начало одного с концом другого, и будет суммой векторов. Это можно записать так: $\overline{AB} + \overline{BC} = \overline{AC}$.

Векторы можно вычитать. Чтобы из вектора \overline{AB} (уменьшаемое) вычесть вектор \overline{AD} (вычитаемое), надо прибавить к вектору \overline{AB} вектор \overline{AD} в противоположном направлении.

Если два вектора \overline{AB} и \overline{AD} имеют общее начало (рис. 51, в), то разность их геометрически изображается вектором, идущим от конца вектора вычитаемого к концу вектора уменьшаемого.

Вектор можно умножить на число. Произведением вектора \overline{AB} на целое число m называется новый вектор $\overline{AB}m$ (длина его равна $\overline{AB}m$), имеющий то же направление, что и \overline{AB} , если $m > 0$; прямо противоположное ему, если $m < 0$; при $m = 0$ произведение \overline{AB} на m является нулевым вектором.

Вектор можно разделить на число. Чтобы разделить вектор \overline{AB} на число (но не на нуль), достаточно умножить этот вектор на обратное число:

$$\frac{\overline{AB}}{m} = \overline{AB} \frac{1}{m}$$

Длина нового вектора равна длине вектора \overline{AB} , разделенной на m , и совпадает с его направлением, если $m > 0$, или противоположно ему, если $m < 0$.

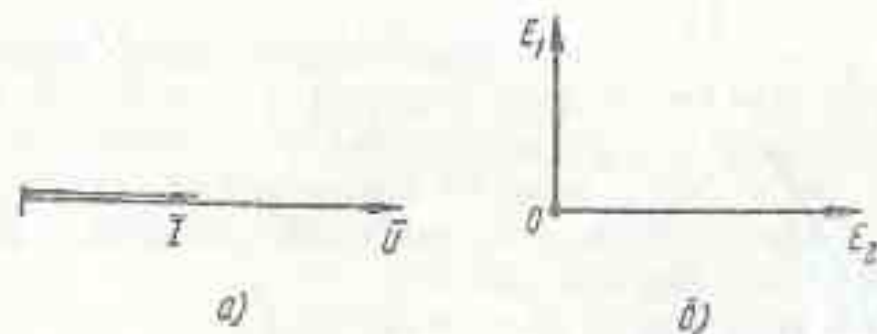


Рис. 52. Векторные диаграммы:
а — ток и напряжения, совпадающих по фазе, б — двух э. д. с., сдвинутых по фазе на 90°

Переменный ток, переменная э. д. с. и переменное напряжение изображают в виде векторов, длина которых в одном масштабе равна действующим значениям изображаемых величин, а в другом — максимальным (амплитудным) значениям этих величин.

Следует различать векторы переменного тока от физических векторов, имеющих определенное направление в пространстве. Примерами последних могут служить магнитная индукция, напряженность электрического поля, скорость и т. д. Эти векторы принято обозначать буквой со стрелкой над ней (например, \vec{B} или \vec{V}). Векторы, характеризующие условно синусоидальные величины, изображают отрезком прямой со стрелкой на конце, а над буквой в от-

личие от векторов физических, ставят точку. Например, вектор тока \dot{I} , вектор напряжения \dot{U} и т. д.

На векторных диаграммах можно показать, что ток и напряжение совпадают по фазе (рис. 52, а) или э. д. с. сдвинуты по фазе на некоторый угол (рис. 52, б). Условно принято считать, что векторы перемещаются в направлении против движения часовой стрелки.

Если векторы имеют различную длину, следовательно, их действующие значения разные (см. рис. 52, б).

§ 52. АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Сопротивление, включенное в цепь переменного тока, в котором происходит превращение электрической энергии в полезную работу или в тепловую энергию, называется *активным сопротивлением*.

К активным сопротивлениям при промышленной частоте (50 гц) относятся, например, электрические лампы накаливания и электронагревательные устройства.

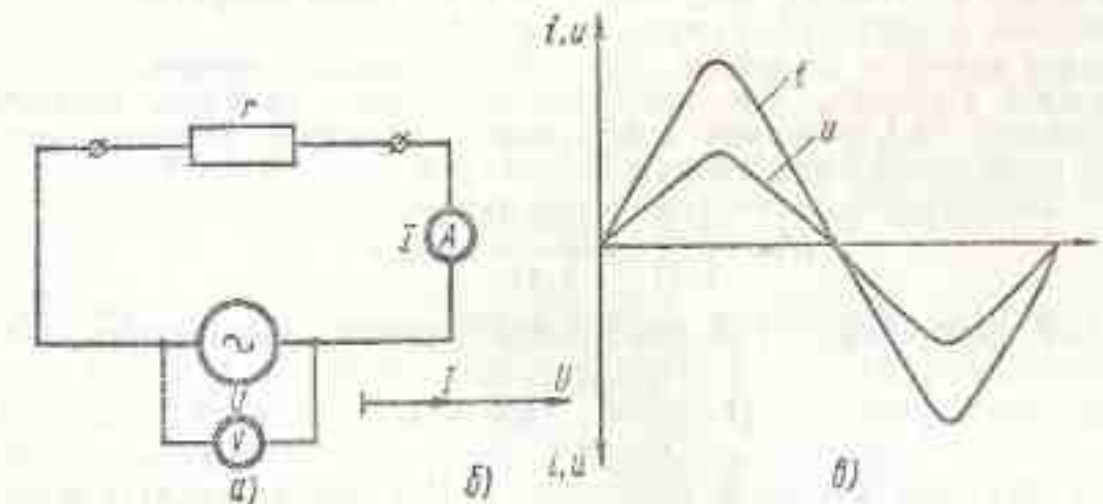


Рис. 53. Цепь переменного тока с активным сопротивлением:
а — схема, б — векторная диаграмма, в — волновая диаграмма

Рассмотрим цепь переменного тока (рис. 53), в которую включено активное сопротивление. В такой цепи под действием переменного напряжения протекает переменный ток. Изменение тока в цепи, согласно закону Ома, зависит только от изменения напряжения, подключенного к ее зажимам. Когда напряжение равно нулю, ток в цепи также равен нулю. По мере увеличения напряжения ток в цепи возрастает и при максимальном значении напряжения ток становится наибольшим. При уменьшении напряжения ток убывает. Когда напряжение изменяет свое направление, ток также изменяет свое направление и т. д.

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

Построим векторную диаграмму действующих величин тока и напряжения для цепи с активным сопротивлением. Для этого отложим в выбранном масштабе по горизонтали вектор напряжения U . Чтобы на векторной диаграмме показать, что напряжение и ток в цепи совпадают по фазе ($\varphi=0$), откладываем вектор тока I по направлению вектора напряжения.

Сила тока в такой цепи определяется по закону Ома:

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

В этой цепи среднее значение мощности, потребляемой активным сопротивлением, выражается произведением действующих значения тока и напряжения.

$$P = IU, \text{ или } P = I^2 r, \text{ или } P = \frac{U^2}{r} \quad (54)$$

Пример. К цепи переменного тока с активным сопротивлением $r=55 \text{ ом}$ подключен генератор, максимальное значение напряжения которого $U_m=310,2 \text{ в}$. Определить:

- 1) показание вольтметра, подключенного к клеммам генератора;
- 2) показание амперметра, включенного в цепь;
- 3) среднее значение мощности, потребляемой сопротивлением.

Решение. Известно, что электроизмерительные приборы, включенные в цепь переменного тока, измеряют действующие значения. Поэтому показание вольтметра, измеряющего напряжение,

$$U = \frac{U_m}{1,41} = \frac{310,2}{1,41} = 220 \text{ в.}$$

Показание амперметра, измеряющего действующее значение тока,

$$I = \frac{U}{r} = \frac{220}{55} = 4 \text{ а.}$$

Среднее значение активной мощности, потребляемой сопротивлением, $P = IU = 220 \cdot 4 = 880 \text{ вт}$ или $P = I^2 r = 4^2 \cdot 55 = 16 \cdot 55 = 880 \text{ вт}$.

§ 53. ИНДУКТИВНОСТЬ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Прохождение электрического тока по проводнику или катушке сопровождается появлением магнитного поля. Рассмотрим электрическую цепь переменного тока (рис. 54, а), в которую включена катушка индуктивности, имеющая небольшое количество витков проволоки сравнительно большого сечения, активное сопротивление которой можно считать практически равным нулю.

Под действием э. д. с. генератора в цепи протекает переменный ток, возбуждающий переменный магнитный поток. Этот поток пересекает «собственные» витки катушки и в ней возникает электродвижущая сила самоиндукции

$$\epsilon_0 = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad (55)$$

где L — индуктивность катушки,
 $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ — скорость изменения тока в ней.

Электродвижущая сила самоиндукции, согласно правилу Ленца, всегда противодействует причине, вызывающей ее. Так как э. д. с. самоиндукции всегда противодействует изменениям переменного тока, вызываемым э. д. с. генератора, то она препятствует прохождению переменного тока. При расчетах это учитывается по индуктивному сопротивлению, которое обозначается X_L и измеряется

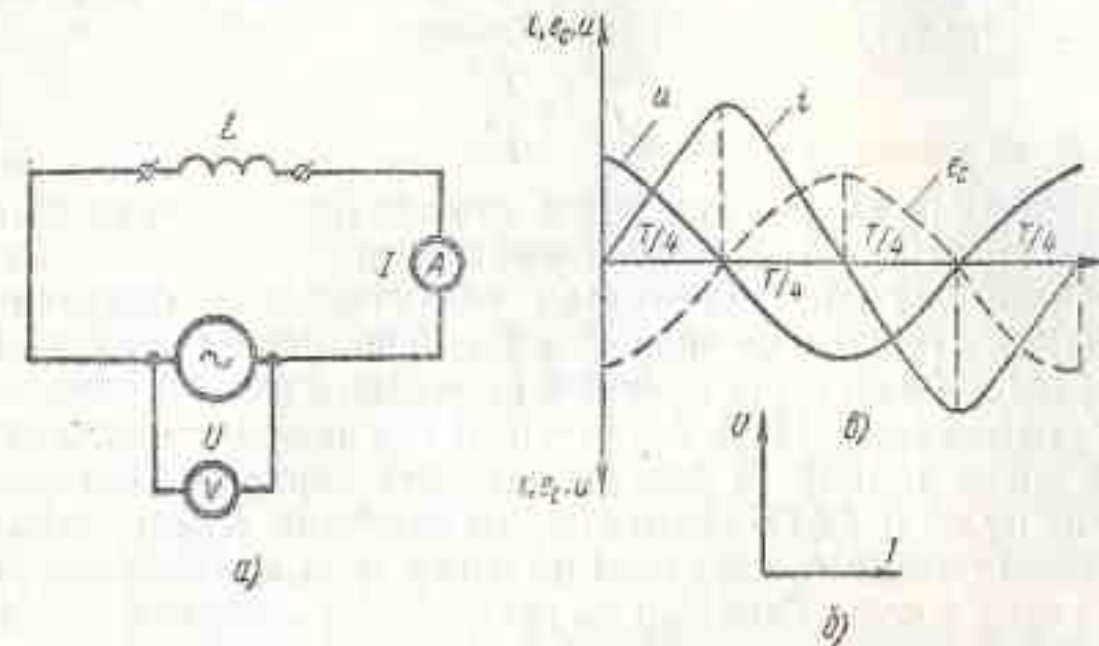


Рис. 54. Цепь переменного тока с индуктивностью:
 а — схема, б — векторная диаграмма, в — полная диаграмма

в омах. Таким образом, индуктивное сопротивление катушки X_L зависит от величины э. д. с. самоиндукции, а следовательно, оно, как и э. д. с. самоиндукции, зависит от скорости изменения тока в катушке (от частоты ω) и от индуктивности катушки L :

$$X_L = \omega L \quad (56)$$

где X_L — индуктивное сопротивление, ом,
 ω — угловая частота переменного тока, рад/сек,
 L — индуктивность катушки, гн.

Так как угловая частота переменного тока $\omega = 2\pi f$, то индуктивное сопротивление

$$X_L = 2\pi f L \quad (57)$$

где f — частота переменного тока, гц.

Пример. Катушка, обладающая индуктивностью $L=0,5 \text{ гн}$, присоединена к источнику переменного тока, частота которого $f=50 \text{ гц}$.

Определить:

- 1) индуктивное сопротивление катушки при частоте $f=50 \text{ гц}$;
- 2) индуктивное сопротивление этой катушки переменному току, частота которого $f=800 \text{ гц}$.

Решение. Индуктивное сопротивление переменному току при $f=50 \text{ гц}$

$$X_L = 2\pi f L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,5 = 157 \text{ ом.}$$

При частоте тока $f=800 \text{ гц}$

$$X_L = 2\pi f L = 2 \cdot 3,14 \cdot 800 \cdot 0,5 = 2512 \text{ ом.}$$

Приведенный пример показывает, что индуктивное сопротивление катушки повышается с увеличением частоты переменного тока, протекающего по ней. По мере уменьшения частоты тока индуктивное сопротивление убывает. Для постоянного тока, когда ток в катушке не изменяется и магнитный поток не пересекает ее витки, э. д. с. самоиндукции не возникает, индуктивное сопротивление катушки X_L равно нулю. Катушка индуктивности для постоянного тока представляет собой лишь сопротивление

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

Выясним, как изменяется э. д. с. самоиндукции, когда по катушке индуктивности протекает переменный ток.

Известно, что при неизменной индуктивности катушки э. д. с. самоиндукции зависит от скорости изменения силы тока и она всегда направлена навстречу причине, вызвавшей ее.

На графике (рис. 54, а) переменный ток показан в виде синусоиды (сплошная линия). В первую четверть периода сила тока возрастает от нулевого до максимального значения. Электродвижущая сила самоиндукции e_c , согласно правилу Ленца, препятствует увеличению тока в цепи. Поэтому на графике (пунктирной линией) показано, что e_c в это время имеет отрицательное значение. Во вторую четверть периода сила тока в катушке убывает до нуля. В это время э. д. с. самоиндукции изменяет свое направление и увеличивается, препятствуя убыванию силы тока. В третью четверть периода ток изменяет свое направление и постепенно увеличивается до максимального значения; э. д. с. самоиндукции имеет положительное значение и далее, когда сила тока убывает, э. д. с. самоиндукции опять меняет свое направление и вновь препятствует уменьшению силы тока в цепи.

Из сказанного следует, что ток в цепи и э. д. с. самоиндукции не совпадают по фазе. Ток опережает э. д. с. самоиндукции по фазе на четверть периода или на угол $\varphi = 90^\circ$. Необходимо также иметь в виду, что в цепи с индуктивностью, не содержащей r , в каждый момент времени электродвижущая сила самоиндукции направлена навстречу напряжению генератора U . В связи с этим напряжение и э. д. с. самоиндукции e_c также сдвинуты по фазе друг относительно друга на 180° .

Из изложенного следует, что в цепи переменного тока, содержащей только индуктивность, ток отстает от напряжения, вырабатываемого генератором, на угол $\varphi = 90^\circ$ (на четверть периода) и опережает э. д. с. самоиндукции на 90° . Можно также сказать, что в индуктивной цепи напряжение опережает по фазе ток на 90° .

Построим векторную диаграмму тока и напряжения для цепи переменного тока с индуктивным сопротивлением. Для этого отложим вектор тока I по горизонтали в выбранном нами масштабе (рис. 54, б.)

Чтобы на векторной диаграмме показать, что напряжение опережает по фазе ток на угол $\varphi = 90^\circ$, откладываем вектор напряже-

ния U вверх под углом 90° . Закон Ома для цепи с индуктивностью можно выразить так:

$$I = \frac{U}{X_L}, \text{ или } I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{2\pi f L}. \quad (58)$$

Следует подчеркнуть, что имеется существенное отличие между индуктивным и активным сопротивлением переменному току.

Когда к генератору переменного тока подключена активная нагрузка, то энергия безвозвратно потребляется активным сопротивлением.

Если же к источнику переменного тока присоединено индуктивное сопротивление $r = 0$, то его энергия, пока сила тока возрастает, расходуется на возбуждение магнитного поля. Изменение этого поля вызывает возникновение э. д. с. самоиндукции. При уменьшении силы тока энергия, запасенная в магнитном поле, вследствие возникающей при этом э. д. с. самоиндукции возвращается обратно генератору.

В первую четверть периода сила тока в цепи с индуктивностью возрастает и энергия источника тока накапливается в магнитном поле. В это время э. д. с. самоиндукции направлена против напряжения.

Когда сила тока достигнет максимального значения и начинает во второй четверти периода убывать, то э. д. с. самоиндукции, изменив свое направление, стремится поддержать ток в цепи. Под действием э. д. с. самоиндукции энергия магнитного поля возвращается к источнику энергии — генератору. Генератор в это время работает в режиме двигателя, преобразуя электрическую энергию в механическую.

В третью четверть периода сила тока в цепи под действием э. д. с. генератора увеличивается, и при этом ток протекает в противоположном направлении. В это время энергия генератора вновь накапливается в магнитном поле индуктивности.

В четвертую четверть периода сила тока в цепи убывает, а накопленная в магнитном поле энергия при воздействии э. д. с. самоиндукции вновь возвращается генератору.

Таким образом, в первую и третью четверть каждого периода генератор переменного тока расходует свою энергию в цепи с индуктивностью на создание магнитного поля, а во вторую и четвертую четверть каждого периода энергия, запасенная в магнитном поле катушки в результате возникающей э. д. с. самоиндукции, возвращается обратно генератору.

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

Из сказанного следует, что индуктивное сопротивление является реактивным. В цепи, содержащей реактивное сопротивление, происходят колебания энергии от генератора к нагрузке и обратно.

В главе I § 10 был объяснен процесс заряда и разряда конденсатора, включенного в цепь постоянного тока.

Рассмотрим теперь цепь переменного тока (рис. 55, а), в которую включена электрическая емкость (конденсатор). Активным сопротивлением этой цепи пренебрегаем ($r=0$).

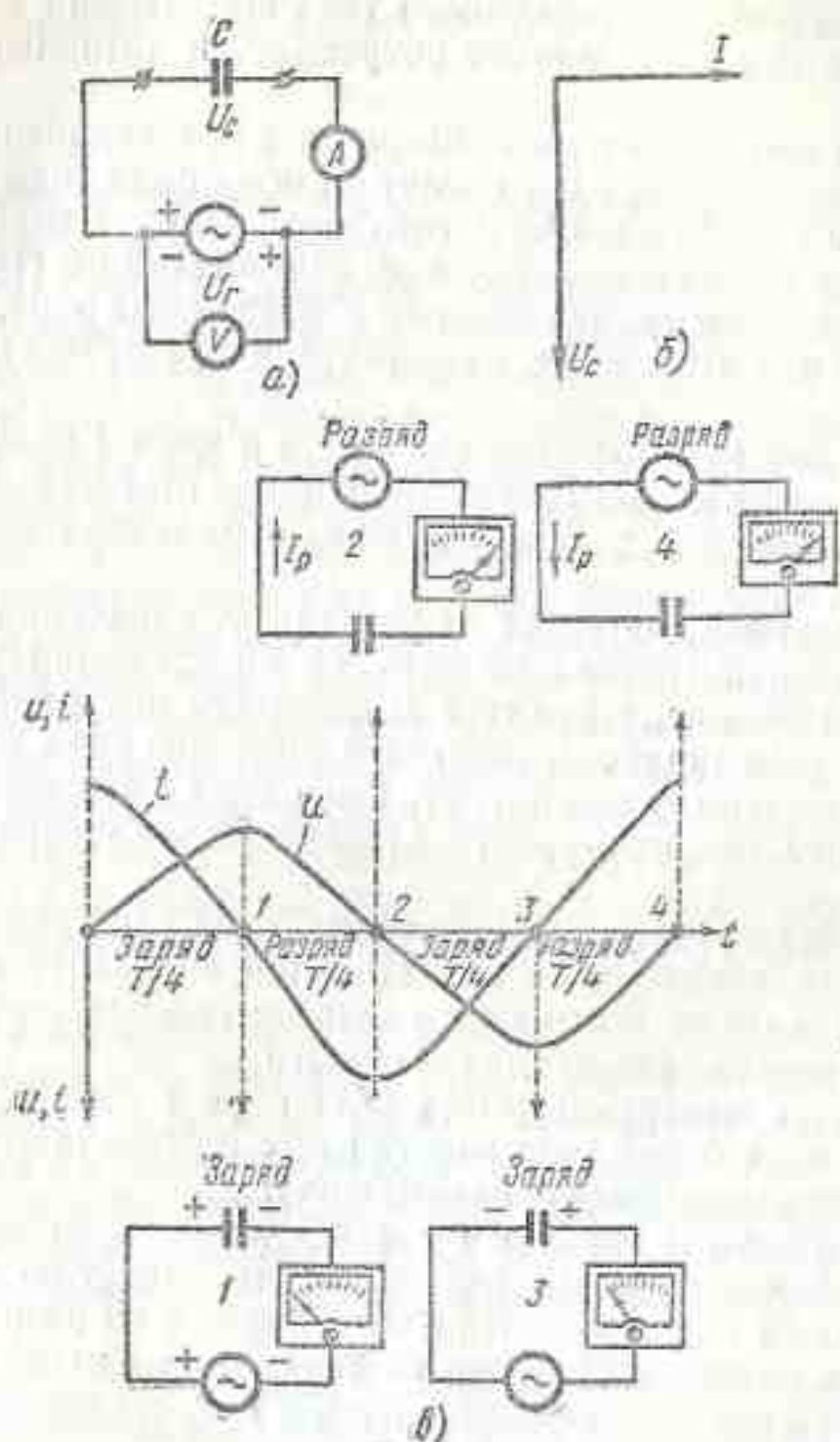


Рис. 55. Цепь переменного тока с емкостью:
а — схема, б — векторная диаграмма, в — волновая диаграмма

Полярность зажимов генератора переменного тока, включенного в цепь с емкостью, меняется с частотой $\omega = 2\pi f$.

В первую четверть периода (рис. 55, в) конденсатор заряжается и на его пластинах появляются противоположные по знаку электрические заряды (на левой пластине плюс, на правой — минус).

При заряде конденсатора по проводам, соединяющим генератор с пластинами, перемещаются электрические заряды, следовательно, протекает зарядный ток, измеряемый миллиамперметром. Через диэлектрик конденсатора ток не проходит. Как видно на волновой диаграмме, в первую четверть периода во время заряда конденсатора напряжение на пластинах конденсатора возрастает от нуля до максимального значения, сила тока, наоборот, в начале заряда будет максимальной, а в конце заряда, когда напряжение на конденсаторе (U_c) окажется равным напряжению генератора (U_g), она станет равной нулю.

За вторую четверть периода напряжение генератора постепенно убывает и становится равным нулю. В это время конденсатор разряжается. При этом разрядный ток, протекающий по проводам, имеет направление, противоположное направлению тока заряда.

За третью четверть периода полярность на зажимах генератора изменится и напряжение возрастет от нуля до наибольшего значения. В это время конденсатор вновь зарядится, но полярность на его пластинах изменится. На левой пластине будет отрицательный заряд, на правой — положительный заряд. По проводам пройдет зарядный ток, сила которого к концу заряда конденсатора, когда $U_c = U_g$, станет равной нулю.

В четвертую часть периода напряжение генератора убывает и становится равным нулю. Конденсатор в это время вторично разряжается, и по проводам, соединяющим генератор с пластинами конденсатора, вновь протекает разрядный ток.

Из сказанного следует, что за один период изменения переменного напряжения дважды происходит процесс заряда и разряда конденсатора и при этом в его цепи протекает переменный ток. Кроме того, при заряде и разряде конденсатора ток в цепи и напряжение не совпадают по фазе. Ток опережает по фазе напряжение на четверть периода, т. е. на 90° .

Построим векторную диаграмму для цепи переменного тока с емкостью (рис. 55, б). Для этого отложим вектор тока I в выбранном масштабе по горизонтали. Чтобы на векторной диаграмме показать, что напряжение отстает от тока на угол $\varphi = 90^\circ$, откладываем вектор напряжения U_c вниз под углом 90° .

Выясним, от чего зависит сила тока в цепи с емкостью. Обозначим сопротивление цепи X_c и назовем его емкостным сопротивлением. Тогда закон Ома для цепи с емкостью можно выразить так:

$$I = \frac{U}{X_c}, \quad (59)$$

где U — напряжение генератора, в;
 X_c — емкостное сопротивление, ом;
 I — сила тока, а.

Известно, что сила тока в цепи определяется количеством электрических зарядов, проходящих через поперечное сечение проводника в единицу времени:

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

Если в единицу времени по проводам протекает большое количество зарядов, то сила тока будет большой, и наоборот, когда по проводам в каждую секунду протекает малое количество зарядов, то сила тока оказывается незначительной.

Допустим, что частота переменного тока, вырабатываемого генератором, большая. В этом случае в каждую секунду конденсатор много раз (часто) заряжается и разряжается. В проводах, идущих от генератора к пластинам конденсатора, будет перемещаться в каждую секунду большое количество электрических зарядов. Поэтому можно сказать, что в рассматриваемой цепи возникает большая сила тока и в данном случае, согласно закону Ома, емкостное сопротивление цепи X_c оказывается малой величиной.

Если же частота переменного тока генератора будет мала, то конденсатор в каждую секунду зарядится и разрядится меньшее количество раз. В связи с этим по проводам цепи в каждую секунду пройдет незначительное количество зарядов и сила тока будет мала, а следовательно, емкостное сопротивление цепи, наоборот, будет большим.

Из сказанного можно сделать вывод, что емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте переменного тока.

Емкостное сопротивление зависит не только от частоты переменного тока, но и от величины емкости, включенной в цепь.

Допустим, что в цепь включен конденсатор большой емкости. Количество электричества, которое накапливает конденсатор при заряде и отдает при разряде, прямо пропорционально его емкости:

$$q = CU.$$

Чем больше емкость конденсатора, включенного в цепь переменного тока, тем большее количество электричества переместится при заряде и разряде по проводам, идущим от генератора к его пластинам. Поэтому в проводах возникает ток большой силы и в данном случае, согласно закону Ома, емкостное сопротивление цепи X_c будет мало. Если же включенная в цепь емкость мала, то при заряде и разряде по проводам пройдет меньшее количество электрических зарядов и сила тока будет незначительной, следовательно, емкостное сопротивление цепи, наоборот, будет большим.

Из сказанного можно сделать вывод, что емкостное сопротивление обратно пропорционально емкости.

Таким образом, емкостное сопротивление:

$$X_c = \frac{1}{\omega C}, \quad (60)$$

где X_c — емкостное сопротивление, ом;

ω — угловая частота переменного тока, рад/сек;

C — емкость, ф.

Известно, что угловая частота $\omega = 2\pi f$.

Поэтому емкостное сопротивление можно определить так:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}, \quad (61)$$

где f — частота переменного тока, гц.

Если включенная емкость измеряется в микрофарадах, то емкостное сопротивление

$$X_c = \frac{1\,000\,000}{2\pi f C} \text{ ом, или } X_c = \frac{1\,000\,000}{\omega C} \text{ ом.}$$

Если емкость измеряется в пикофарадах, то

$$X_c = \frac{10^{12}}{\omega C} \text{ ом, или } X_c = \frac{10^{12}}{2\pi f C} \text{ ом.}$$

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

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

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

Пример. Конденсатор емкостью $C = 2$ мкф включен в цепь переменного тока, частота которого 50 гц. Определить:

1) его емкостное сопротивление при частоте $f = 50$ гц;

2) емкостное сопротивление этого конденсатора переменному току, частота которого 500 гц.

Решение. Емкостное сопротивление конденсатора переменному току при частоте $f = 50$ гц

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1\,000\,000}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 2} = \frac{1\,000\,000}{628} = 1592 \text{ ом.}$$

При частоте $f = 500$ гц

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1\,000\,000}{2 \cdot 3,14 \cdot 500 \cdot 2} = 159,2.$$

Из приведенного примера видно, что емкостное сопротивление конденсатора уменьшается с повышением частоты, а с уменьшением частоты переменного тока емкостное сопротивление возрастает. Для постоянного тока, когда напряжение на зажимах цепи не изменяется, конденсатор практически обладает бесконечно большим сопротивлением и поэтому он постоянного тока не пропускает.

§ 55. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С АКТИВНЫМ И ИНДУКТИВНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ

Любая проволочная катушка, включенная в цепь переменного тока, обладает активным сопротивлением, зависящим от материала, длины и сечения проволоки ($r = \frac{l}{S}$), и индуктивным сопротив-

лением, которое зависит от индуктивности катушки и частоты переменного тока, протекающего по ней ($X_L = \omega L = 2\pi fL$). Такую катушку можно рассматривать как приемник энергии, в котором активное и индуктивное сопротивления соединены последовательно.

Рассмотрим цепь переменного тока, в которую включена катушка индуктивности (рис. 56, а) с активным r и индуктивным X_L сопротивлением. Падение напряжения на активном сопротивлении

$$U_a = Ir.$$

Падение напряжения на индуктивном сопротивлении

$$U_L = IX_L.$$

Построим векторную диаграмму тока и напряжения (рис. 56, б) для рассматриваемой цепи.

Отложим по горизонтали вектор тока I в выбранном масштабе. Известно, что ток и напряжение в цепи с активным сопротивлением совпадают по фазе, поэтому вектор падения напряжения на активном сопротивлении откладываем по вектору тока.

В цепи с индуктивностью ток отстает от напряжения на угол $\varphi = 90^\circ$. Поэтому вектор падения напряжения на индуктивном сопротивлении откладываем на диаграмме вверх под углом 90° к вектору тока.

Для определения общего напряжения, приложенного к цепи, сложим векторы \dot{U}_a и \dot{U}_L . Суммой этих векторов будет диагональ параллелограмма — вектор \dot{U} . Треугольник AOB , стороны которого выра-

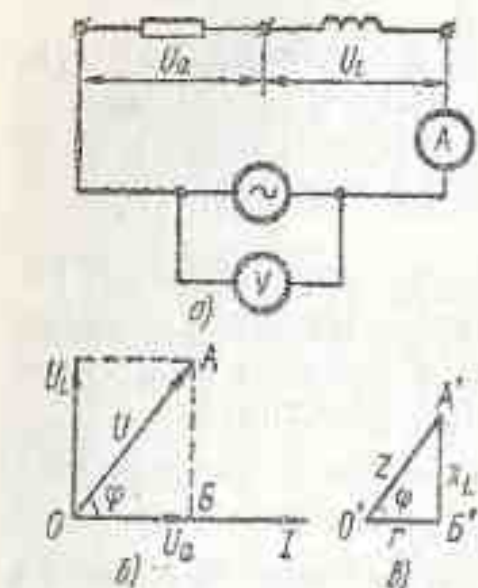


Рис. 56. Цепь переменного тока с активным и индуктивным сопротивлениями:

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

жают соответственно напряжения U_a , U_L и общее напряжение U , называется *треугольником напряжений*. На основании теоремы Пифагора — в прямоугольном треугольнике квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов — следует, что общее напряжение на зажимах цепи

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}. \quad (62)$$

Пример. Падение напряжения на активном сопротивлении $U_a = 15$ в. Напряжение на индуктивном сопротивлении $U_L = 26$ в. Вычислить общее напряжение, приложенное к цепи.

Решение. Общее напряжение на зажимах цепи переменного тока с последовательно соединенными активным и индуктивным сопротивлениями

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2} = \sqrt{15^2 + 26^2} = \sqrt{225 + 676} = \sqrt{901} \approx 30 \text{ в.}$$

Чтобы определить полное сопротивление цепи переменного тока с активным и индуктивным сопротивлениями, следует разделить

векторы $U_a = Ir$ и $U_L = IX_L$ на число I , выражающее силу тока в цепи, и построить треугольник $A'O'B'$ (рис. 56, в), стороны которого меньше сторон треугольника напряжений в I раз. Образованный треугольник называется *треугольником сопротивлений*. Его сторонами являются сопротивления r и X_L и полное сопротивление цепи Z .

Пользуясь теоремой Пифагора, можно написать, что

$$Z^2 = r^2 + X_L^2,$$

отсюда полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{r^2 + X_L^2}. \quad (63)$$

Пример. Активное сопротивление катушки $r = 7$ ом, а ее индуктивное сопротивление $X_L = 24$ ом. Вычислить полное сопротивление катушки.

Решение. Полное сопротивление катушки переменному току

$$Z = \sqrt{r^2 + X_L^2} = \sqrt{7^2 + 24^2} = \sqrt{49 + 576} = \sqrt{625} = 25 \text{ ом.}$$

Сила тока в цепи с активным и индуктивным сопротивлениями определяется по закону Ома:

$$I = \frac{U}{Z}, \text{ или } I = \frac{\sqrt{U_a^2 + U_L^2}}{\sqrt{r^2 + X_L^2}}. \quad (64)$$

На векторной диаграмме видно, что в цепи переменного тока с активным и индуктивным сопротивлениями ток и напряжение не совпадают по фазе. Ток отстает от напряжения на угол φ .

Угол сдвига между током и напряжением можно определить, если известен косинус этого угла.

Из треугольника напряжений косинус угла сдвига фаз

$$\cos \varphi = \frac{U_a}{U}. \quad (65)$$

Теперь можно, пользуясь таблицей тригонометрических функций, определить угол φ .

Пример. Падение напряжения на активном сопротивлении катушки $U_a = 30$ в. Общее напряжение на ее зажимах $U = 60$ в. Определить угол сдвига фаз между током и напряжением в цепи.

Решение. На основании данных найдем

$$\cos \varphi = \frac{U_a}{U} = \frac{30}{60} = 0,5.$$

По таблице тригонометрических функций угол сдвига фаз при $\cos \varphi = 0,5$ составляет 60° .

По треугольнику сопротивлений можно также определить угол сдвига фаз между током и напряжением:

$$\cos \varphi = \frac{r}{Z}. \quad (66)$$

Пример. Активное сопротивление катушки составляет 5 ом, а ее полное сопротивление $Z = 30$ ом. Определить угол сдвига фаз.

Решение.

$$\cos \varphi = \frac{r}{Z} = \frac{5}{20} = 0,25.$$

При $\cos \varphi = 0,25$ угол $\varphi = 75^\circ$.

§ 56. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С АКТИВНЫМ, ИНДУКТИВНЫМ И ЕМКОСТНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ

На рис. 57, а изображена цепь переменного тока, в которую включены последовательно активное сопротивление r , индуктивность L , обладающая индуктивным сопротивлением X_L , и емкость C , обладающая емкостным сопротивлением X_C .

Под действием переменного напряжения в этой цепи протекает переменный ток.

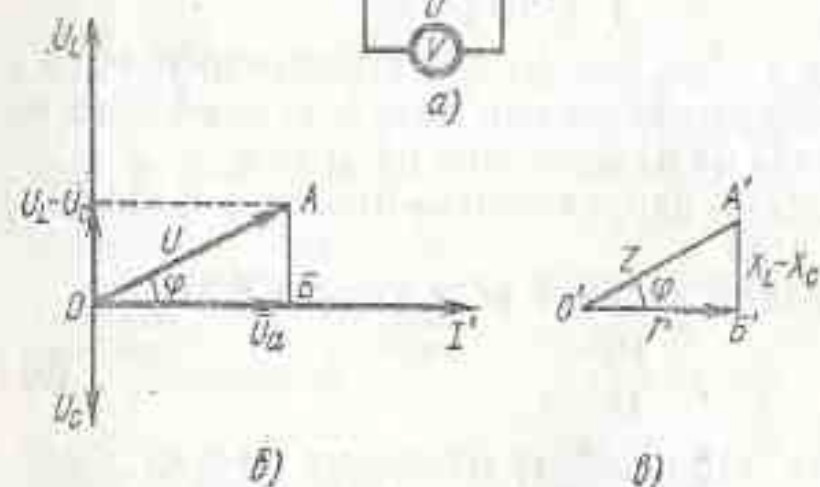
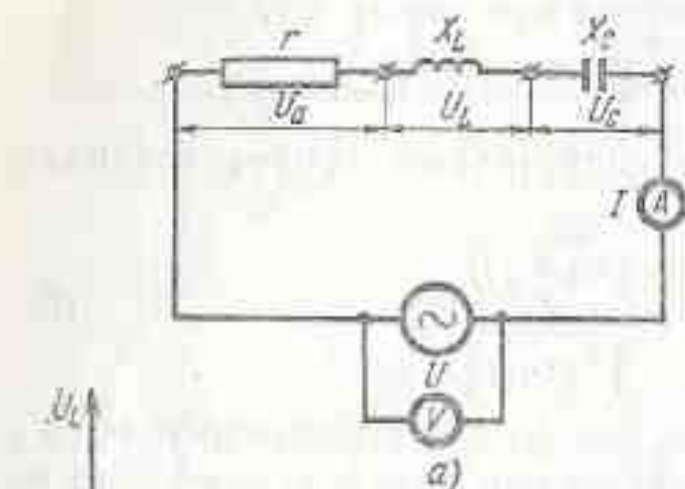


Рис. 57. Цепь переменного тока с активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями: а — схема, б — векторная диаграмма, в — треугольник сопротивлений

под углом 90° к вектору тока.

В цепи с емкостью, наоборот, напряжение отстает от тока на угол $\varphi = 90^\circ$. Поэтому вектор \dot{U}_C откладываем на диаграмме вниз под углом 90° к вектору тока.

Для определения общего напряжения, приложенного к зажимам цепи, сложим векторы \dot{U}_L и \dot{U}_C . Для этого отнимем от большего вектора \dot{U}_L вектор \dot{U}_C и получим вектор $\dot{U}_L - \dot{U}_C$, выражающий векторную сумму этих двух напряжений. Теперь сложим векторы $(\dot{U}_L - \dot{U}_C)$ и \dot{U}_a . Суммой этих векторов будет диагональ паралле-

лограмма — вектор \dot{U} , изображающий общее напряжение на зажимах цепи.

На основании теоремы Пифагора из треугольника напряжений AOB следует, что

$$U^2 = U_a^2 + (U_L - U_C)^2,$$

отсюда общее напряжение

$$U = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2}. \quad (67)$$

Определим полное сопротивление цепи переменного тока, содержащей активное, индуктивное и емкостное сопротивления. Для этого разделим стороны треугольника напряжений AOB на число I , выражающее силу тока в цепи, и получим подобный треугольник сопротивлений $A'O'B'$ (рис. 57, в). Его сторонами являются сопротивления r , $(X_L - X_C)$ и полное сопротивление цепи Z .

Пользуясь теоремой Пифагора, можно написать, что

$$Z^2 = r^2 + (X_L - X_C)^2.$$

Отсюда полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{r^2 + (X_L - X_C)^2}. \quad (68)$$

Формула (68) может применяться и в частных случаях, когда $X_L = 0$ или $X_C = 0$.

Силу тока в цепи с активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями определяют по закону Ома:

$$I = \frac{U}{Z}, \quad \text{или} \quad I = \frac{\sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2}}{\sqrt{r^2 + (X_L - X_C)^2}}. \quad (69)$$

На векторной диаграмме (рис. 57, б) видно, что в рассматриваемой цепи ток и напряжение генератора не совпадают по фазе. Из треугольника напряжений следует, что

$$\cos \varphi = \frac{U_a}{U}.$$

Из треугольника сопротивлений

$$\cos \varphi = \frac{r}{Z}.$$

§ 57. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫМИ СОПРОТИВЛЕНИЯМИ

На рис. 58 изображена цепь переменного тока, в которую включены параллельно две катушки. Каждая из этих катушек обладает соответственно активным сопротивлением r_1 и r_2 и индуктивным сопротивлением X_{L1} и X_{L2} .

Полное сопротивление первой катушки

$$Z_1 = \sqrt{r_1^2 + X_{L1}^2}$$

Полное сопротивление второй катушки

$$Z_2 = \sqrt{r_2^2 + X_{L2}^2}$$

Напряжение на зажимах катушек равно напряжению генератора.

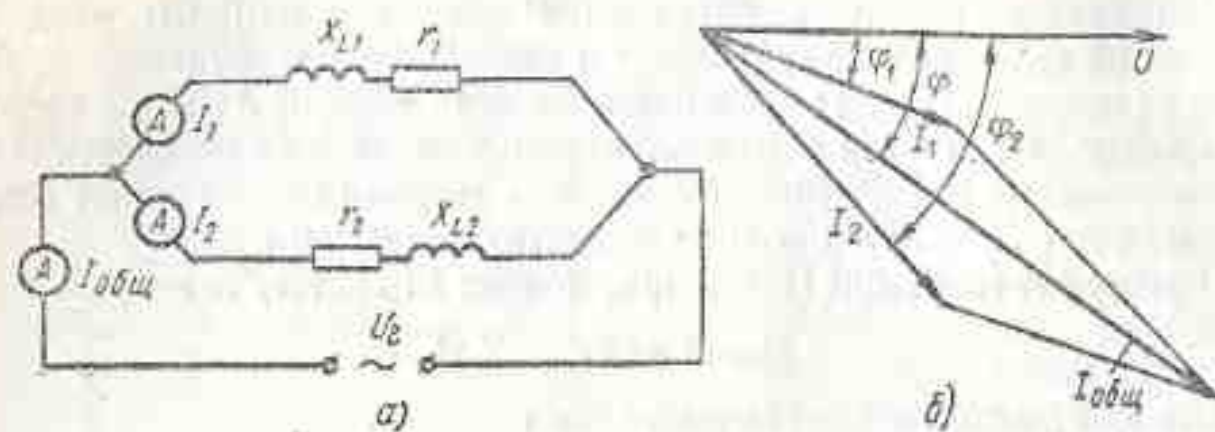


Рис. 58. Цепь переменного тока с параллельно соединенными сопротивлениями:
а — схема, б — векторная диаграмма

Сила тока в каждой катушке определяется согласно закону Ома:

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} \text{ и } I_2 = \frac{U}{Z_2}$$

Из этих равенств можно сделать вывод, что в такой цепи токи разветвляются обратно пропорционально полным сопротивлениям ветвей.

Для определения угла сдвига фаз между напряжением и током в каждой катушке вычисляют $\cos \varphi_1 = \frac{r_1}{Z_1}$ и $\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{Z_2}$ и по таблице тригонометрических функций находят значения углов φ_1 и φ_2 .

Чем больше угол сдвига фаз между напряжением и током, тем больше реактивный ток и меньше активный, тем хуже используется электрический ток в данной установке, ниже ее коэффициент мощности ($\cos \varphi$).

Так как первый закон Кирхгофа справедлив для цепей переменного тока, то в рассматриваемой цепи общий ток определяется геометрическим сложением векторов (рис. 58, б).

По горизонтали в выбранном масштабе отложим вектор напряжения \dot{U} . Так как ток в цепи с индуктивностью отстает от напряжения, то вектор тока \dot{I}_1 в выбранном масштабе отложим с помощью транспортира под углом φ_1 к вектору напряжения \dot{U} , а вектор тока \dot{I}_2 отложим под углом φ_2 . Общий ток в цепи будет равен

сумме векторов тока \dot{I}_1 и \dot{I}_2 , который определяется с учетом выбранного масштаба.

Чтобы найти общий ток, нужно воспользоваться тем, что активная составляющая общего тока — общий активный ток равен сумме активных токов ветвей:

$$I_a = I \cos \varphi = I_1 \cos \varphi_1 + I_2 \cos \varphi_2 + I_3 \cos \varphi_3,$$

а общий реактивный ток — сумме реактивных токов ветвей (если все эти реактивные токи, отстающие по фазе или все опережающие):

$$I_p = I \sin \varphi = I_1 \sin \varphi_1 + I_2 \sin \varphi_2 + I_3 \sin \varphi_3.$$

После чего определяют общий ток:

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}. \quad (70)$$

Угол сдвига фаз между общим током и напряжением φ находят по векторной диаграмме.

Пример. Три катушки соединены параллельно и к ним подключено переменное напряжение $U=100$ в. Частота тока 50 гц. Активное сопротивление катушки $r_1=2$ ом; $r_2=3$ ом; $r_3=4$ ом.

Индуктивность катушек $L_1=0,04$ гн; $L_2=0,03$ гн; $L_3=0,01$ гн.

Вычислить силу тока в каждой катушке и общий ток в цепи, а также угол сдвига фаз между током и напряжением.

Решение.

Индуктивное сопротивление катушек:

$$X_{L1} = 2\pi f L_1 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,04 = 12,56 \text{ ом};$$

$$X_{L2} = 2\pi f L_2 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,03 = 9,42 \text{ ом};$$

$$X_{L3} = 2\pi f L_3 = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,01 = 3,14 \text{ ом}.$$

Полное сопротивление катушек:

$$Z_1 = \sqrt{r_1^2 + X_{L1}^2} = \sqrt{2^2 + 12,56^2} = 12,72 \text{ ом};$$

$$Z_2 = \sqrt{r_2^2 + X_{L2}^2} = \sqrt{3^2 + 9,42^2} = 9,85 \text{ ом};$$

$$Z_3 = \sqrt{r_3^2 + X_{L3}^2} = \sqrt{4^2 + 3,14^2} = 5,08 \text{ ом}.$$

Сила тока в катушках:

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{100}{12,72} = 7,85 \text{ а}; \quad I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{100}{9,85} = 10,15 \text{ а};$$

$$I_3 = \frac{U}{Z_3} = \frac{100}{5,08} = 19,7 \text{ а}.$$

Общий ток в цепи равен векторной сумме токов.

Для определения угла сдвига фаз между током и напряжением каждой ветви вычисляют:

$$\cos \varphi_1 = \frac{r_1}{Z_1} = \frac{2}{12,72} = 0,157.$$

По таблице тригонометрических функций находят, что если $\cos \varphi_1 = 0,157$, то угол сдвига фаз в первой ветви $\varphi_1 = 80^\circ 55'$; если $\cos \varphi_2 = 0,305$, то угол сдвига фаз $\varphi_2 = 72^\circ 15'$; если $\cos \varphi = 0,79$, то угол $\varphi_3 = 37^\circ 50'$.

Зная угол сдвига фаз между током и напряжением для каждой ветви, построим векторную диаграмму токов и напряжения и определим по ней общую силу тока в цепи.

Для этого отложим по горизонтали в выбранном масштабе вектор напряжения \dot{U} .

Под углом $\varphi_1 = 80^\circ 55'$ с помощью транспортира отложим вектор тока $I_1 = 7,85$ а. Под углом $\varphi_2 = 72^\circ 15'$ (к горизонтали) отложим вектор $I_2 = 10,15$ а как продолжение вектора I_1 . Под углом $\varphi_3 = 37^\circ 50'$ (к горизонтали) отложим вектор $I_3 = 19,7$ а как продолжение вектора I_2 . Общий ток равен длине вектора \dot{I} с учетом выбранного масштаба, который соединяет начало вектора \dot{I}_1 и конец вектора \dot{I}_3 . Для нашего примера он равен 35,5 а. Общий угол сдвига фаз между током I и напряжением U измеряют с помощью транспортира, он равен 56° .

§ 58. ПОНЯТИЕ О РЕЗОНАНСЕ НАПРЯЖЕНИЙ

В цепи переменного тока с активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями, соединенными последовательно (рис. 59, а), может возникнуть резонанс напряжений.

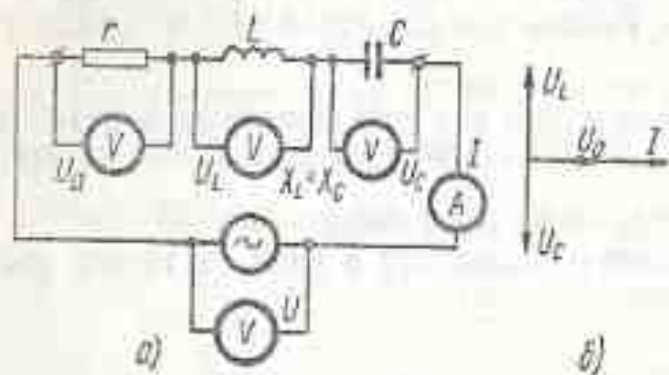


Рис. 59. Цепь переменного тока при резонансе напряжений:

а — схема, б — векторная диаграмма

При резонансе напряжения на зажимах индуктивного и емкостного сопротивлений могут стать значительно больше, чем напряжение на зажимах цепи.

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

$$X_L = X_C \text{ или } \omega L = \frac{1}{\omega C}.$$

Допустим, что подбором индуктивности и емкости или изменением частоты создано условие, при котором $X_L = X_C$. Когда цепь не настроена в резонанс, то ее полное сопротивление

$$Z = \sqrt{r^2 + (X_L - X_C)^2},$$

а в рассматриваемой цепи при резонансе (когда $X_L = X_C$) ее полное сопротивление

$$Z = \sqrt{r^2} \text{ или } Z = r. \quad (71)$$

Таким образом, полное сопротивление цепи при резонансе оказывается равным активному сопротивлению.

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

$$U_a = Ir.$$

Напряжение на индуктивности определяется согласно закону Ома произведением силы тока на величину индуктивного сопротивления. Так как в цепи увеличилась сила тока, то напряжение $U_L = IX_L$ возросло.

Напряжение на емкости также определяется произведением тока

на величину емкостного сопротивления. Поэтому напряжение на емкости $U_C = IX_C$.

В связи с тем, что в последовательно соединенных сопротивлениях протекает одинаковый ток и при резонансе индуктивное сопротивление X_L равно емкостному сопротивлению X_C , напряжение на индуктивности и напряжение на емкости равны:

$$U_L = U_C \text{ или } IX_L = IX_C.$$

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

Построим векторную диаграмму (рис. 59, б) для рассматриваемой цепи при резонансе напряжений. Отложим по горизонтали в выбранном масштабе вектор тока \dot{I} . В активном сопротивлении ток и напряжение совпадают по фазе. Поэтому вектор напряжения \dot{U}_r отложим по вектору тока. Так как напряжение на индуктивности опережает ток на 90° , то вектор \dot{U}_L отложим вверх под углом 90° .

Напряжение на емкости отстает от тока на 90° , поэтому вектор \dot{U}_C , равный вектору \dot{U}_L , отложим вниз под углом 90° к вектору тока. На векторной диаграмме видно, что напряжение на индуктивности и напряжение на емкости равны и сдвинуты по фазе друг относительно друга на 180° и взаимно компенсируются.

Угол сдвига фаз между током и напряжением при резонансе равен нулю. Это значит, что ток и напряжение совпадают по фазе (как в цепи с активным сопротивлением).

Пример. В цепь переменного тока включены последовательно активное сопротивление $r = 5$ ом, индуктивность $L = 0,005$ гн и емкость 63,5 мкф. Генератор, включенный в цепь, вырабатывает переменное напряжение $U = 2,5$ в с резонансной частотой $f = 285$ гц. Определить индуктивное и емкостное сопротивления, полное сопротивление цепи, ток, протекающий в цепи, напряжение на емкости и на индуктивности.

Решение. Индуктивное сопротивление

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

Емкостное сопротивление

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 285 \cdot 63,5} = 8,9 \text{ ом.}$$

Индуктивное сопротивление равно емкостному сопротивлению и, следовательно, в цепи наступает резонанс напряжений.

Полное сопротивление цепи при резонансе

$$Z = \sqrt{3^2 + (8,9 - 8,9)^2} = \sqrt{9} = 3 \text{ ом.}$$

Сила тока в цепи

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

Напряжение на индуктивности

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

$$U_c = I X_c = 0,83 \cdot 8,9 = 7,4 \text{ в.}$$

Как видно из приведенного примера, напряжения на индуктивности и емкости равны и превышают напряжение генератора.

§ 59. ПОНЯТИЕ О РЕЗОНАНСЕ ТОКОВ

В цепи переменного тока, в которой индуктивность и емкость соединены параллельно (рис. 60, а), может возникнуть резонанс токов при условии равенства токов в индуктивности I_L и емкости I_C .

В результате резонанса токов общий ток в цепи может быть относительно мал, а в контуре индуктивности и емкости, где происхо-

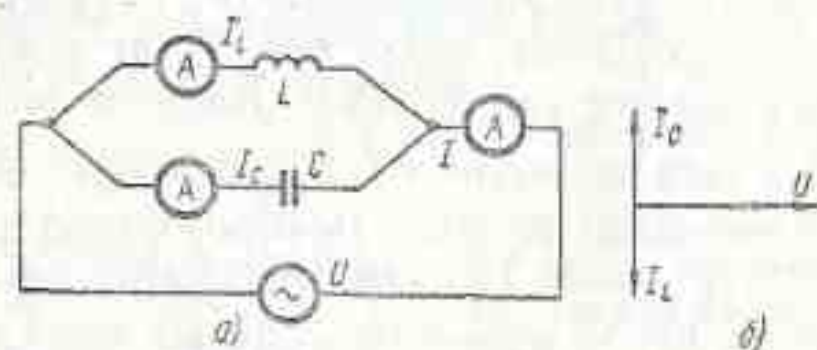


Рис. 60. Цепь переменного тока при резонансе токов:

а — схема, б — векторная диаграмма

дят электрические колебания, протекает переменный ток, значительно больший общего.

Для понимания сущности резонанса токов выясним, как получаются электрические колебания в цепи, состоящей из параллельно соединенных индуктивности и емкости.

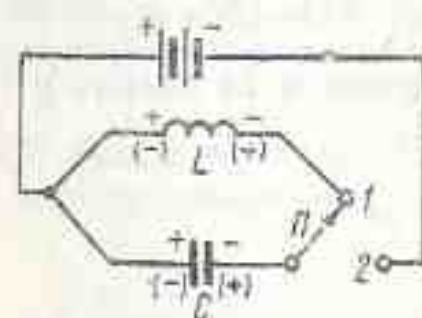


Рис. 61. Схема колебательного контура

Для этого рассмотрим схему (рис. 61).

Если установить переключатель P в положение 2, то конденсатор заряжается до напряжения источника электрической энергии. Перемещением переключателя в положение 1 конденсатор отключается от источника электрической энергии и оказывается присоединенным к катушке индуктивности. Конденсатор разряжается, и по катушке протекает ток разряда, в результате этого появляется магнитное поле, которое пересекает «собственные» витки катушки, и в ней воз-

никает э. д. с. самоиндукции, препятствующая увеличению тока. Ток будет возрастать постепенно и достигнет наибольшей величины в тот момент, когда конденсатор разрядится. К этому времени энергия электрического поля конденсатора превращается в энергию магнитного поля катушки индуктивности.

Можно предположить, что в связи с разрядом конденсатора ток в контуре прекратится. Однако такое предположение ошибочно, так

как возникающая э. д. с. самоиндукции препятствует убыванию тока. В связи с этим ток в катушке продолжает протекать и уменьшается до нуля не сразу, а постепенно, он перезаряжает конденсатор под воздействием э. д. с. самоиндукции. Теперь правая пластина конденсатора заряжается положительным электричеством, а левая — отрицательным, после чего снова начинается разряд конденсатора, но ток разряда теперь будет уже иметь противоположное (отрицательное) направление. Энергия конденсатора вновь перейдет в энергию магнитного поля катушки, а затем конденсатор опять перезарядится — на левой пластине будет положительный заряд, а на правой — отрицательный. Так этот процесс будет повторяться периодически.

Таким образом, в контуре LC , который называется колебательным, появляются свободные электрические колебания, происходящие только при наличии первоначального заряда конденсатора без повторного подключения к нему источника электрической энергии.

Наибольшая сила тока в контуре и его амплитуда зависят только от величины первоначального заряда конденсатора, а частота свободных электрических колебаний в контуре определяется, в свою очередь, индуктивностью катушки L и емкостью конденсатора C , включенных в контур.

Известно, что при резонансе токов (при $r=0$) индуктивное сопротивление равно емкостному и реактивные проводимости равны между собой.

$$2\pi f C = \frac{1}{2\pi/L}, \quad (72)$$

отсюда следует, что

$$4\pi^2 f^2 LC = 1;$$

$$f^2 = \frac{1}{4\pi^2 LC}.$$

Извлечем корень квадратный из этой величины. Тогда получим, что частота свободных электрических колебаний в контуре

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}, \quad (73)$$

где f — частота тока, гц;

L — индуктивность, гн;

C — емкость, ф.

Из формулы (73) следует, что, изменяя величину емкости или индуктивности контура, можно изменять — регулировать частоту свободных колебаний, т. е. можно настраивать контур на определенную частоту.

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

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

В электронных устройствах необходимо иметь возможность получать незатухающие электрические колебания, амплитуда которых неизменна в течение длительного времени. Для этого к контуру подключают генератор переменного тока.

Когда колебательный контур соединен с генератором, частота вынужденных колебаний в отличие от частоты свободных колебаний в контуре не зависит от емкости и индуктивности самого контура, а зависит лишь от частоты переменного тока, который вырабатывает генератор.

Как известно, чтобы в рассматриваемой цепи наступил резонанс токов, необходимо создать такие условия, при которых ток в индуктивности I_L и ток в емкости I_C были бы равны друг другу.

Допустим, что подбором индуктивности и емкости или изменением частоты созданы условия для резонанса токов, т. е.

$$I_L = I_C \text{ и } X_L = X_C.$$

На параллельно соединенных сопротивлениях X_L и X_C напряжения одинаковы. Ток в индуктивности $I = \frac{U}{X_L}$, а ток в емкости

$I_C = \frac{U}{X_C}$. Построим векторную диаграмму для рассматриваемой цепи (рис. 60, б) при резонансе токов. Отложим в выбранном нами масштабе вектор напряжения \dot{U} . Ток в индуктивности отстает от напряжения на угол $\varphi = 90^\circ$. Поэтому вектор тока \dot{I}_L отложим вниз под углом 90° к вектору напряжения \dot{U} . Так как ток в емкости опережает напряжение на угол $\varphi = 90^\circ$, то вектор тока \dot{I}_C , равный по условию резонанса токов вектору тока \dot{I}_L , отложим вверх под углом 90° к вектору напряжения \dot{U} .

На векторной диаграмме видно, что ток в индуктивности и ток в емкости сдвинуты по фазе на угол $\varphi = 180^\circ$ и равны друг другу. Отсюда следует, что общий ток при резонансе токов равен нулю, а полное сопротивление цепи бесконечно велико.

В действительности общий ток будет относительно мал, но не равен нулю. Этот ток, который вырабатывает генератор, является активным и покрывает потери энергии в контуре.

§ 60. МОЩНОСТЬ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Полная мощность генератора переменного тока определяется произведением тока на напряжение:

$$S = UI, \quad (74)$$

где S — полная мощность, в а;

I — действующая сила тока, на которую рассчитана обмотка генератора, а;

U — расчетное действующее значение напряжения генератора, в.

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

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

Мощность, расходуемая в активном сопротивлении, преобразуется в полезную работу или тепло, рассеиваемое в пространство.

Реактивная часть мощности обусловлена колебаниями энергии (см. § 52 и 53) при создании и исчезновении магнитных и электрических полей. Энергия то запасается в полях реактивных сопротивлений, то возвращается генератору, включенному в цепь. Реактивные токи, протекающие между генератором и реактивными приемниками, обладающими индуктивным и емкостным сопротивлениями, бесполезно загружают линию и генератор и этим вызывают дополнительные потери энергии.

Связь между полной, активной и реактивной мощностями определим из треугольника мощностей. Для построения треугольника мощностей умножим стороны треугольника напряжений (рис. 62, а) на силу тока I , тогда получим подобный треугольник мощностей $A'O'B'$ (рис. 62, б). Сторона $O'B'$ этого треугольника равна активной мощности P , сторона $B'A'$ — реактивной мощности Q , а гипотенуза $A'O'$ треугольника равна полной мощности S .

Из треугольника мощностей следует, что отношение

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

Отсюда активная мощность $P = S \cos \varphi$. Так как полная мощность генератора переменного тока $S = UI$, то активная мощность определяется так:

$$P = UI \cos \varphi \quad (75)$$

и измеряется в ваттах. Из этого же треугольника следует, что отношение $\frac{Q}{S} = \sin \varphi$.

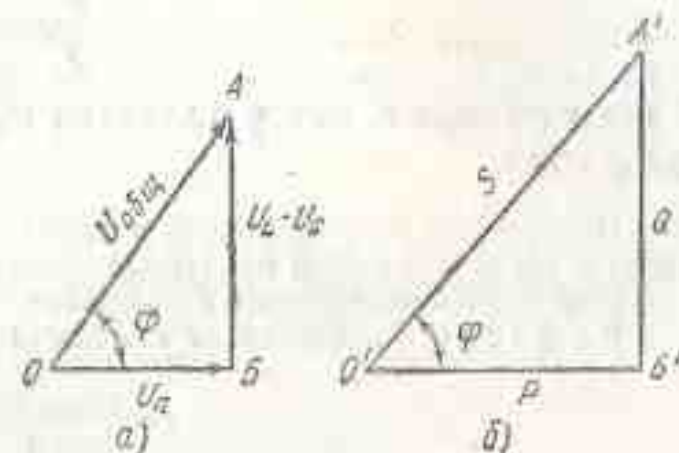


Рис. 62. Треугольник напряжений (а) и мощностей (б) для цепи переменного тока, содержащей активное сопротивление, индуктивность и емкость.

Отсюда реактивная мощность

$$Q = S \sin \varphi \text{ или } Q = UI \sin \varphi \quad (76)$$

и измеряется в вольт-амперах реактивных (*вар*). Полная мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (77)$$

измеряется в вольт-амперах (*ва*).

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

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi. \quad (78)$$

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

Пример. Полная мощность установки $S = 800$ *ва*. Ваттметр, измеряющий активную часть мощности, показывает что она равна 720 *вт*.

Определить коэффициент мощности.

Решение. Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{720}{800} = 0,9.$$

Это значит, что 90% полной мощности расходуется в виде активной мощности на полезную работу, а 10% обусловлены наличием реактивной бесполезной мощности.

В цепи переменного тока с активным сопротивлением ток и напряжение совпадают по фазе и угол сдвига фаз равен нулю. Так как $\cos \varphi = 1$, то активная мощность для такой цепи $P = IU$, т. е. равна полной мощности. В данном случае вся мощность генератора используется для полезной работы.

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

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

Причиной низкого коэффициента мощности может быть работа электродвигателей станков или машин вхолостую; недогрузка станка, связанная с тем, что на станке большой мощности обрабатываются мелкие детали; неправильный выбор мощности двигателя, устанавливаемого на станке; низкое качество ремонта двигателя; плохая смазка и т. д. При нормальной нагрузке двигателя его коэффициент мощности составляет 0,83—0,85. При холостом ходе двигателя его коэффициент мощности понижается и составляет 0,1—0,3.

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

Установлено, что повышение коэффициента мощности в энергосистемах нашей страны только на 0,01 может дать ежегодно экономию более 500 млн. *квт·ч* электрической энергии.

Таким образом, повышение коэффициента мощности и экономное расходование электрической энергии — важное государственное дело.

Пример. Произвести расчет электрической цепи переменного тока, в которую включена катушка, обладающая индуктивным сопротивлением $X_L = 30$ *ом* и активным сопротивлением $r = 40$ *ом*. Напряжение на зажимах катушки 120 *в*. Определить:

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

Решение. 1. Полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{r^2 + X_L^2} = \sqrt{40^2 + 30^2} = \sqrt{1600 + 900} = \sqrt{2500} = 50 \text{ ом}$$

2. Сила тока в цепи $I = \frac{U}{Z} = \frac{120}{50} = 2,4$ *а*.

3. Коэффициент мощности $\cos \varphi = \frac{r}{Z} = \frac{40}{50} = 0,8$.

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

4. Полная мощность $S = IU = 2,4 \cdot 120 = 288$ *ва*.

5. Активная мощность $P = IU \cos \varphi = 2,4 \cdot 120 \cdot 0,8 = 230,4$ *вт*.

6. Реактивная мощность $Q = IU \sin \varphi$.

Так как синус угла $\varphi = 36^\circ$, примерно 0,6, то $Q = 2,4 \cdot 120 \cdot 0,6 = 172,8$ *вар*.

Контрольные вопросы

1. Что называется переменным током?
2. Что называется периодом переменного тока?
3. В каких единицах измеряется частота переменного тока?
4. В какой цепи переменного тока ток и напряжение совпадают по фазе?
5. От каких величин зависит индуктивное сопротивление катушки?
6. По какой формуле можно вычислить сопротивление цепи переменного тока, содержащей активное и индуктивное сопротивления?
7. От каких величин зависит полная мощность генератора переменного тока?
8. Что называется коэффициентом мощности?

ГЛАВА V
ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 61. ТРЕХФАЗНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Выше были рассмотрены свойства однофазного переменного тока. Однако однофазная система неэкономична вследствие несовершенства однофазных электрических машин. Так, например, при одинаковых габаритах, весах активных материалов (стали и меди) и потерях энергии мощность однофазной машины в 1,5 раза меньше мощности трехфазной машины. Поэтому для передачи электроэнергии по проводам на большие расстояния с меньшими потерями энергии используют трехфазные системы переменного тока.

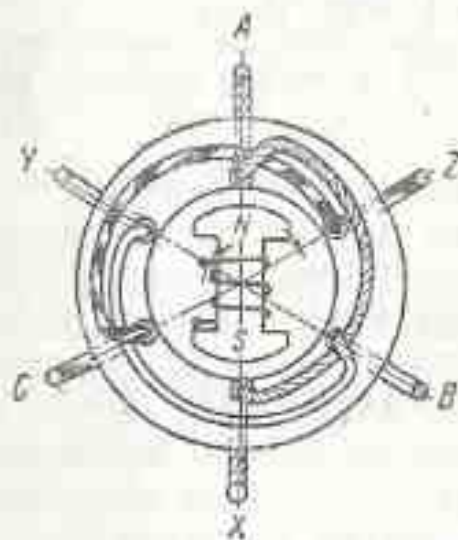


Рис. 63. Схема устройства простейшего трехфазного генератора

Трехфазной системой переменного тока или просто трехфазной системой называется цепь или сеть переменного тока, в которой действуют три э. д. с. одинаковой частоты, но взаимно смещенные по фазе на одну треть периода. Отдельные цепи, составляющие трехфазную систему, называются фазами. Если э. д. с. во всех трех фазах имеют одинаковую амплитуду, то такая трехфазная система называется симметричной. Впервые в мире передача трехфазного тока была осуществлена русским ученым М. О. Доливо-Добровольским в 1891 г. На рис. 63 показана схема простейшего двухполюсного трехфазного генератора. В пазах статора (неподвижная часть машины) расположены три катушки $A-X$, $B-Y$ и $C-Z$, сдвинутые в пространстве на $1/3$ окружности (120°). Внутри статора помещается ротор (вращающаяся часть машины), представляющий собою двухполюсный электромагнит, питаемый постоянным током, возбуждающим магнитное поле. Ротор приводится во вращение каким-либо двигателем. Магнитные линии, вращаясь вместе с ротором, пересекают проводники катушек, заложенных в пазах статора, и индук-

тируют в этих катушках э. д. с., изменяющиеся синусоидально. Однако синусоиды э. д. с. фаз A , B и C будут сдвинуты одна по отношению к другой на $1/3$ периода (рис. 64).

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

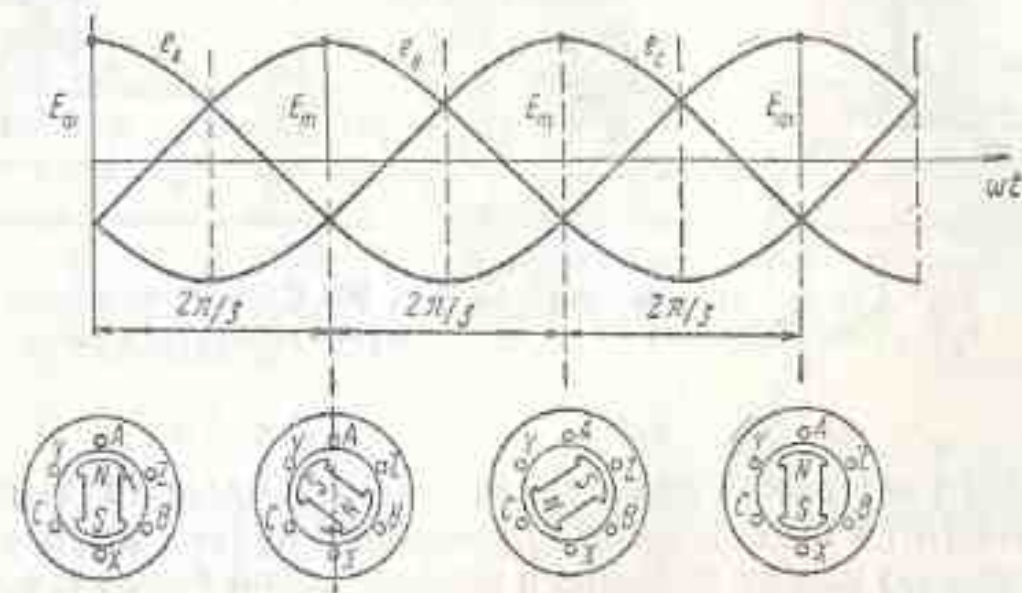


Рис. 64. Кривые изменения э. д. с. в трехфазной обмотке генератора при вращении ротора

а центр южного полюса — под проводником Y . Для этого ротор должен повернуться на $1/3$ окружности (120°), что соответствует промежутку времени, равному $1/3$ периода. Положительный максимум э. д. с. E_m в катушке $C-Z$ наступит через $1/3$ периода после такого же максимума в катушке $B-Y$, что соответствует дальнейшему повороту ротора на $1/3$ окружности.

При нагрузке генератора на зажимах катушки $A-X$, $B-Y$ и $C-Z$ устанавливаются напряжения, называемые фазными. При отсутствии нагрузки (при холостом ходе) фазные напряжения равны э. д. с., индуцируемому в фазах обмотки статора.

§ 62. СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК ГЕНЕРАТОРА

На рис. 65 показана схема генератора, у которого имеются три независимые однофазные цепи. Э. д. с. в этих цепях одинаковы, имеют одинаковые амплитуды и сдвинуты по фазе на $1/3$ периода. К каждой паре зажимов обмотки статора генератора можно подключить провода, подводящие ток к нагрузке. Эти три фазы выгоднее объединить в одну общую трехфазную систему. Для этого обмотки генератора соединяют между собой звездой или треугольником.

При соединении обмоток генератора звездой (рис. 66) концы всех трех фаз X , Y и Z (или начала A , B и C) соединяются между

собой, а от начала (или концов) выводятся провода, отводящие энергию в сеть. Полученные таким образом три провода называются *линейными*, а напряжение между любыми двумя линейными проводами — *линейными напряжениями* $U_{\text{л}}$. От общей точки соединенных концов (или начал) трех фаз (от нулевой точки звезды) может

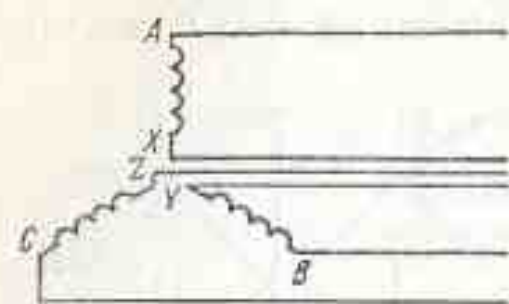


Рис. 65. Схема несвязанной трехфазной системы

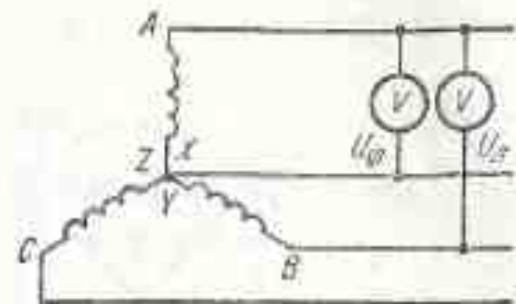


Рис. 66. Схема соединения обмоток генератора звездой

быть отведен четвертый провод, называемый *нулевым*. Напряжение между любым из трех линейных проводов и нулевым проводом равно напряжению между началом и концом одной фазы, т. е. фазному напряжению U_{ϕ} .

Обычно все фазы обмотки генератора выполняют одинаковыми так, что действующие значения э. д. с. в фазах равны, т. е. $E_A = E_B = E_C$. Если в цепь каждой фазы генератора включить нагрузку, то по этим цепям будут протекать токи. В случае одинакового по величине и характеру сопротивления всех трех фаз приемника, т. е. при равномерной нагрузке, токи в фазах равны по силе и сдвинуты по фазе относительно своих напряжений на один и тот же угол φ . Как максимальные, так и действующие значения фазных напряжений при равномерной нагрузке равны, т. е. $U_A = U_B = U_C$. Эти напряжения сдвинуты по фазе на 120° , как показано на векторной диаграмме (рис. 67). Напряжение между любыми точками схемы (см. рис. 66) соответствует векторам (рис. 67) между теми же точками. Так, например, напряжение между

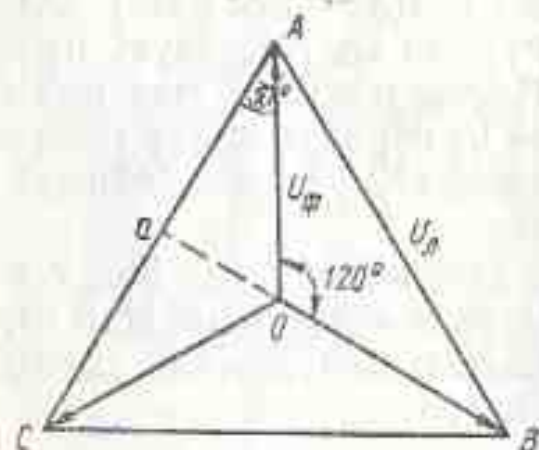


Рис. 67. Векторная диаграмма напряжений при соединении обмоток генератора звездой

точками A и O схемы (фазное напряжение U_A) соответствует вектору A—O диаграммы, а напряжение между линейными проводами A и B схемы — вектору линейного напряжения AB диаграммы. По векторной диаграмме легко установить соотношение между линейным и фазным напряжением. Из треугольника AOb можно записать следующее соотношение:

$$\frac{1}{2} U_{\text{л}} = U_{\phi} \cos 30^\circ = U_{\phi} \frac{\sqrt{3}}{2},$$

откуда

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\phi} \text{ или } U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \quad (79)$$

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

Из схемы (см. рис. 66) видно, что при соединении обмоток генератора звездой ток в линейном проводе равен току в фазах генератора, т. е. $I_{\text{л}} = I_{\phi}$.

На основании первого закона Кирхгофа можем записать, что ток в нулевом проводе равен геометрической сумме токов в фазах генератора, т. е.

$$I_0 = I_A + I_B + I_C \quad (80)$$

При равномерной нагрузке токи в фазах генератора равны между собой и сдвинуты по фазе на $1/3$ периода. Геометрическая сумма токов трех фаз в этом случае равна нулю, т. е. в нулевом проводе тока не будет. Поэтому при симметричной нагрузке нулевой провод может отсутствовать. При несимметричной нагрузке ток в нулевом проводе не равен нулю, но обычно нулевой провод имеет меньшее поперечное сечение, чем линейные.

При соединении обмоток генератора треугольником (рис. 68) начало (или конец) каждой фазы соединяется с концом (или началом) другой фазы. Таким образом, три фазы генератора образуют замкнутый контур, в котором действует э. д. с., равная геометрической сумме э. д. с., индуцированных в фазах генератора, т. е. $E_A + E_B + E_C$. Так как э. д. с. в фазах генератора равны и сдвинуты на $1/3$ периода по фазе, то геометрическая сумма их равна нулю и, следовательно, в замкнутом контуре трехфазной системы, соединенной треугольником, никакого тока при отсутствии внешней нагрузки не будет.

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

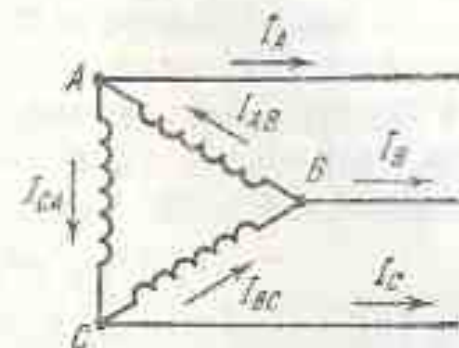


Рис. 68. Схема соединения обмоток генератора треугольником

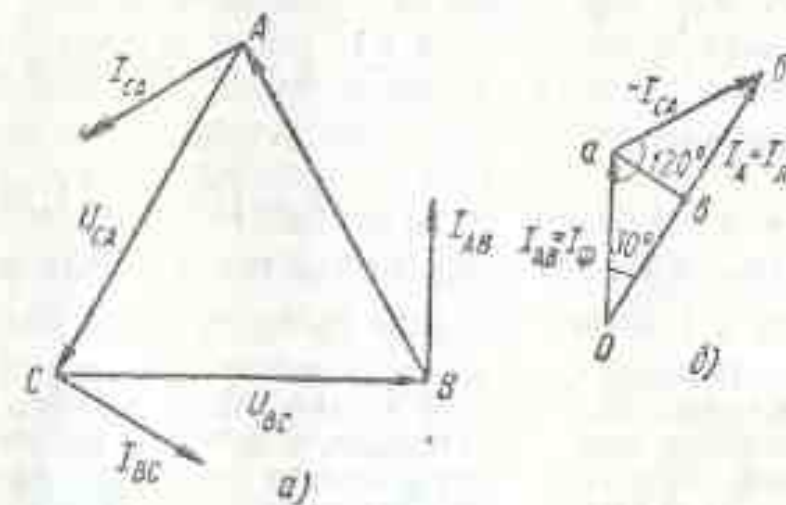


Рис. 69. Векторная диаграмма: а — напряжений и токов в фазах генератора при соединении обмоток треугольником, б — фазных и линейных токов

равно напряжению между началом и концом одной фазы. Таким образом при соединении обмоток генератора треугольником линейное напряжение равно фазному, т. е.

$$U_n = U_\phi.$$

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

На рис. 69, а изображена векторная диаграмма, на которой показаны векторы фазных напряжений и токов.

Точки соединений фаз и линейных проводов *A*, *B* и *C* являются точками разветвления, и линейные токи не равны фазным. Приняв за положительное направление фазных и линейных токов, указанное на рис. 69, на основании первого закона Кирхгофа для мгновенных значений токов можно написать следующие выражения:

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}; \quad I_B = I_{BC} - I_{AB}; \quad I_C = I_{CA} - I_{BC}.$$

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

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

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

Для построения вектора линейного тока I_A изобразим вектор фазного тока I_{AB} (рис. 69, б), из конца которого построим вектор $-I_{CA}$, равный и противоположно направленный вектору I_{CA} . Вектор, соединяющий начало вектора I_{AB} с концом вектора $-I_{CA}$, является вектором линейного тока I_A . Аналогично могут быть построены векторы линейных токов I_B и I_C .

Из векторной диаграммы (рис. 69, б) легко вывести соотношение между линейными и фазными токами при соединении обмоток генератора треугольником. Из треугольника *oab* можно записать:

$$\frac{1}{2} I_n = I_\phi \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2} I_\phi,$$

откуда

$$I_n = \sqrt{3} I_\phi = 1,73 I_\phi,$$

т. е. при соединении обмоток генератора треугольником линейный ток в $\sqrt{3}$ раза больше фазного (при равномерной нагрузке).

Пример. Трехфазный генератор переменного тока, обмотка статора которого соединена звездой, при полной нагрузке имеет линейное напряжение 220 в при линейном токе 10 а. Определить линейное напряжение и ток при полной нагрузке генератора, если обмотка статора его будет соединена треугольником.

Решение: Фазное напряжение генератора

$$U_\phi = \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ в}$$

и фазный ток $I_\phi = I_n = 10 \text{ а}$.

При соединении обмотки генератора треугольником линейное напряжение равно фазному, т. е.

$$U_n = U_\phi = 127 \text{ в}$$

и линейный ток в $\sqrt{3}$ раз больше фазного, т. е.

$$I_n = \sqrt{3} I_\phi = \sqrt{3} \cdot 10 = 17,3 \text{ а}$$

§ 43. ВКЛЮЧЕНИЕ НАГРУЗКИ В СЕТЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

В предыдущем параграфе было отмечено, что трехфазный ток передается четырех- или трехпроводной системой. Как при четырехпроводной, так и при трехпроводной системе потребители энергии могут быть включены в сеть звездой и треугольником.

При четырехпроводной системе для соединения приемников энергии звездой их подключают одним концом к линейному проводу, а другим — к нулевому. Выше мы установили, что при соединении обмоток звездой в случае равномерной нагрузки соотношения между линейными и фазными значениями напряжений и токов таковы:

$$U_n = \sqrt{3} U_\phi \text{ и } I_n = I_\phi.$$

Ток нулевого провода, равный геометрической сумме токов трех фаз, т. е. $I_0 = I_A + I_B + I_C$, при равномерной нагрузке равен нулю. Следовательно, в этом случае в нулевом проводе ток протекать не будет и надобность в этом проводе отпадает. Так, например, трехфазные двигатели переменного тока включаются в сеть звездой без нулевого провода.

При неравномерной нагрузке ток в нулевом проводе не равен нулю и этот провод приходится сохранять, хотя его и выполняют обычно меньшего, чем линейные провода, поперечного сечения. В случае отсутствия нулевого провода или его обрыва при неравномерной нагрузке возникает резкое изменение напряжения. Так, например, при отсутствии нагрузки в фазе *A* и равных нагрузках в фазах *B* и *C* в случае отсутствия нулевого провода нагрузки в этих фазах окажутся включенными последовательно на линейное напряжение, которое равномерно распределяется между ними (из условия равенства нагрузки). Следовательно, сопротивления нагрузки в фазах *B* и *C* окажутся под напряжением, равным половине линейного напряжения, т. е.

$$U_B = U_C = \frac{U_n}{2} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_\phi = 0,86 U_\phi,$$

а напряжение фазы *A* окажется равным $U_A = 1,5 U_\phi$.

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

При включении нагрузок в сеть трехфазного тока треугольником каждая группа нагрузки окажется включенной между двумя линейными проводами. Как было установлено выше, соотношения между линейными и фазными значениями напряжений и токов при соединении приемника энергии треугольником $U_{л} = U_{ф}$, $I_{л} = \sqrt{3} I_{ф}$ (при равномерной нагрузке).

Очень ценным свойством четырехпроводной системы является возможность получения двух различных напряжений. Так, если включить приемники энергии между линейными проводами и нулевым проводом, т. е. звездой, то они окажутся включенными на фазные напряжения. Если другую группу приемников соединить треугольником, то они будут включены только между линейными проводами и окажутся под линейным напряжением, большим в $\sqrt{3}$ раза фазного.

Четырехпроводная система широко используется для электро-снабжения смешанных осветительно-силовых нагрузок. Осветительные нагрузки включают на фазное напряжение, а силовые нагрузки (электродвигатели) — на линейное. Для каждой из фаз трехфазной системы справедливы законы цепи однофазного переменного тока.

Сила тока в фазе

$$I_{ф} = \frac{U_{ф}}{Z_{ф}} \text{ и } \cos \varphi = \frac{r_{ф}}{Z_{ф}}, \quad (81)$$

где $U_{ф}$, $Z_{ф}$, $r_{ф}$ — соответственно напряжение, полное и активное сопротивления рассматриваемой фазы.

Пример 1. Имеется четырехпроводная система с фазным напряжением 127 в. В фазе *A* было включено 2 лампы, в фазе *B* — 8 ламп, фаза *C* отключена. Определить напряжение на лампах в фазах *A* и *B* при отключении нулевого провода.

Решение: Так как фаза *C* отключена, то при обрыве нулевого провода фазы *A* и *B* окажутся включенными последовательно на линейное напряжение, равное $U_{л} = \sqrt{3} U_{ф} = \sqrt{3} \cdot 127 = 220$ в.

Сопротивление фазы *A* в $\frac{8}{2} = 4$ раза больше сопротивления фазы *B*. Поэтому

на лампы фазы *A* приходится $\frac{4}{5}$, а на лампы фазы *B* — $\frac{1}{5}$ линейного напряжения, т. е.

$$U_A = \frac{4}{5} \cdot 220 = 176 \text{ в и } U_B = \frac{1}{5} \cdot 220 = 44 \text{ в.}$$

т. е. лампы фазы *A*, рассчитанные на 127 в, окажутся под повышенным напряжением и перегорят.

Пример 2. В сеть трехфазного тока с линейным напряжением 220 в включили звездой три сопротивления по 10 ом каждое. Затем эти сопротивления переключили, включив их в ту же сеть треугольником. Определить, как изменились линейные и фазные токи после переключения со звезды на треугольник.

Решение: При соединении сопротивлений звездой: фазное напряжение

$$U_{ф} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ в;}$$

фазный ток $I_{ф} = \frac{U_{ф}}{Z_{ф}} = \frac{127}{10} = 12,7 \text{ а;}$

линейный ток $I_{л} = I_{ф} = 12,7 \text{ а.}$

При соединении сопротивлений треугольником:
фазное напряжение $U_{ф} = 220 \text{ в;}$

фазный ток $I_{ф} = \frac{220}{10} = 22 \text{ а;}$

линейный ток $I_{л} = \sqrt{3} I_{ф} = \sqrt{3} \cdot 22 = 38,1 \text{ а.}$

Таким образом, при переключении сопротивлений со звезды на треугольник

линейный ток увеличился в $\frac{38,1}{12,7} = 3$ раза,

а фазный ток в $\frac{22}{12,7} = \sqrt{3} = 1,73$ раза.

§ 64. МОЩНОСТЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Мощность, потребляемая нагрузкой от сети трехфазного тока, равна сумме мощностей, потребляемых отдельными фазами, т. е.

$$P = P_A + P_B + P_C \quad (82)$$

При равномерной нагрузке мощность, потребляемая каждой фазой,

$$P_{ф} = U_{ф} I_{ф} \cos \varphi, \quad (83)$$

где $U_{ф}$ — фазное напряжение,

$I_{ф}$ — фазный ток,

$\cos \varphi$ — коэффициент мощности нагрузки.

Мощность, потребляемая всеми тремя фазами,

$$P = 3 U_{ф} I_{ф} \cos \varphi.$$

При соединении приемников энергии звездой соотношение между линейными и фазными значениями напряжений и токов:

$$U_{л} = \sqrt{3} U_{ф} \text{ и } I_{л} = I_{ф}. \quad (84)$$

Следовательно, мощность, потребляемая нагрузкой от трехфазной сети,

$$P = 3 \frac{U_{л}}{\sqrt{3}} I_{л} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \cos \varphi. \quad (85)$$

При соединении приемников энергии треугольником соотношение между линейными и фазными значениями напряжений и токов:

$$U_{л} = U_{ф} \text{ и } I_{л} = \sqrt{3} I_{ф}. \quad (86)$$

Следовательно, мощность, потребляемая нагрузкой,

$$P = 3 U_{л} \frac{I_{л}}{\sqrt{3}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \cos \varphi. \quad (87)$$

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

$$P = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \cos \varphi = 1,73 U_{л} I_{л} \cos \varphi. \quad (88)$$

Пример. Линейное напряжение трехфазной осветительной установки равно 220 в, а линейный ток 9,9 а. Определить, сколько ламп включено параллельно в каждую фазу нагрузки при соединении этих фаз треугольником и какова мощность всей установки, если каждая лампа потребляет ток 0,52 а.

Решение. Фазное напряжение равно линейному, т. е.

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

Фазный ток

$$I_{\phi} = \frac{I_{\lambda}}{\sqrt{3}} = \frac{9,9}{\sqrt{3}} = 5,72 \text{ а.}$$

Число ламп, включенных параллельно в каждой фазе,

$$\frac{5,72}{0,52} = 11,$$

т. е. всего включено ламп $3 \times 11 = 33$.

Мощность всей установки, имея в виду, что при осветительной нагрузке $\cos \varphi = 1$, находим по следующей формуле:

$$P = \sqrt{3} U_{\lambda} I_{\lambda} \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 9,9 \cdot 1 = 3768 \text{ вт.}$$

При неравномерной нагрузке мощности в фазах различны ($P_A \neq P_B \neq P_C$) и суммарная мощность, потребляемая нагрузкой, равна:

$$P = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C.$$

Для измерения мощности применяют специальные измерительные приборы, называемые *ваттметрами*. При симметричной нагрузке мощность, потребляемая от трехфазной системы, может быть определена одним однофазным ваттметром. В четырехпроводной системе (с нулевым проводом) токовая обмотка ваттметра включается последовательно в один из линейных проводов, а обмотка напряжения — между тем же линейным и нулевым проводами. При таком включении показание ваттметра определит мощность в одной фазе P_{ϕ} , а так как при равномерной нагрузке мощности всех фаз одинаковы, то суммарная мощность трехфазной системы $P = 3 P_{\phi}$.

В трехпроводной системе обмотка напряжения ваттметра включена на линейное напряжение сети, а по токовой его обмотке протекает линейный ток. Поэтому мощность трехфазной системы в $\sqrt{3}$ раз больше показания ваттметра P_w , т. е. $P = \sqrt{3} P_w$.

При несимметричной нагрузке одного ваттметра для определения мощности трехфазной системы недостаточно.

В четырехпроводной системе при несимметричной нагрузке необходимо включение трех ваттметров, обмотки напряжений которых включаются между нулевым и соответствующим линейным проводом. Каждый ваттметр измеряет мощность одной фазы и суммарная мощность трехфазной системы равна сумме показаний трех ваттметров, т. е. $P = P_1 + P_2 + P_3$.

В трехпроводной системе при несимметричной нагрузке наиболее часто используют схему двух ваттметров, которая не может быть использована в четырехпроводной системе. В схеме двух ваттметров обмотки напряжений каждого ваттметра соединены с входным зажимом обмотки тока и линейным проводом, оставшимся свобод-

ным. Полная мощность трехфазной системы равна сумме показаний ваттметров, т. е. $P = P_1 + P_2$.

В лабораторной практике для этой схемы измерения мощности применяют один ваттметр и специальный переключатель, который без разрыва цепи тока дает возможность включать этот ваттметр как в один, так и в другой линейный провод.

При больших углах сдвига фаз между напряжением и током показания одного из ваттметров могут оказаться отрицательными и для измерения мощности необходимо изменить направление тока в обмотке тока, переключив ее. В этом случае суммарная мощность равна разности показаний ваттметров, т. е. $P = P_1 - P_2$.

Энергия в трехфазной системе измеряется как однофазными, так и трехфазными счетчиками электрической энергии. Включение однофазных счетчиков в трехфазную сеть подобно включению ваттметров, описанному выше.

Трехфазные счетчики состояются из двух или трех однофазных, размещенных в одном корпусе и имеющих общий счетный механизм, и называются соответственно двухэлементными и трехэлементными. В трехпроводной системе (без нулевого провода) применяют двухэлементные, а в четырехпроводной системе (с нулевым проводом) — трехэлементные счетчики. Схема включения счетчика электрической энергии указывается на съемной крышке, которой закрывается панель зажимов.

§ 65. ВРАЩАЮЩЕЕСЯ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Действие многофазной машины переменного тока основано на использовании явления вращающегося магнитного поля.

Вращающееся магнитное поле создает любая многофазная система переменного тока, т. е. система с числом фаз две, три и т. д.

Выше было отмечено, что наибольшее распространение получил трехфазный переменный ток. Поэтому рассмотрим вращающееся магнитное поле трехфазной обмотки машины переменного тока (рис. 70).

На статоре расположены три катушки, оси которых сдвинуты взаимно на углы 120° . Каждая катушка для наглядности изображена состоящей из одного витка, находящегося в двух пазах (впадинах) статора. В действительности катушки имеют большое число витков. Буквами *A*, *B*, *C* обозначены начала катушек, *X*, *Y*, *Z* — концы их. Катушки соединены звездой, т. е. концы *X*, *Y*, *Z* соединяются между собой, образуя общую нейтраль, а начала *A*, *B*, *C* подключаются к трехфазной сети переменного тока. Катушки могут соединяться и треугольником.

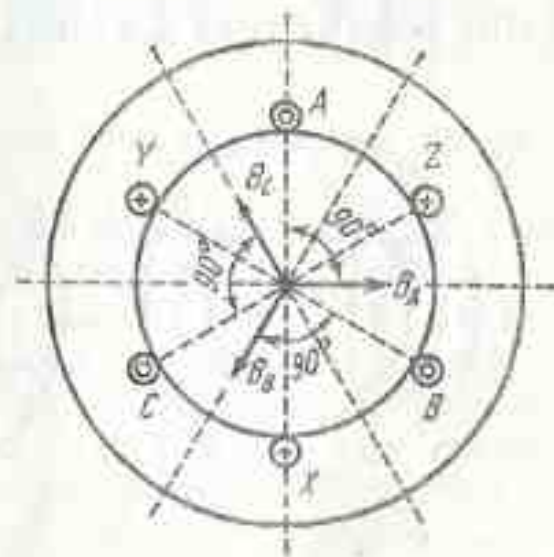


Рис. 70. Простейшая трехфазная обмотка в разрезе

По катушкам протекают синусоидальные токи с одинаковыми амплитудами I_m и частотой $\omega = 2\pi f$, фазы которых смещены на $1/3$ периода (рис. 71).

Токи, протекающие в катушках, возбуждают переменные магнитные поля, магнитные линии которых будут пронизывать катушки в направлении, перпендикулярном их плоскостям. Следовательно, средняя магнитная линия или ось магнитного поля, создаваемого катушкой $A-X$, будет направлена под углом 90° к плоскости этой катушки.

Направления магнитных полей всех трех катушек показаны на рис. 70 векторами B_A , B_B и B_C , сдвинутыми один относительно другого также на 120° .

Условимся считать положительными направления токов в катушках от начала к концу обмотки каждой фазы.

При этом в проводниках статора, подключенных к начальным точкам A, B, C , токи, принятые положительными, будут направлены на зрителя, а в проводниках, подключенных к конечным точкам X, Y и Z , — от зрителя (см. рис. 70).

Положительным направлениям токов будут соответствовать положительные направления магнитных полей, показанные на том же рисунке и определяемые по правилу буравчика.

На рис. 71 приведены кривые токов всех трех катушек, которые позволяют найти мгновенное значение тока каждой катушки для любого момента времени.

Не касаясь количественной стороны явления, определим сначала направления магнитного поля, созданного трехфазной обмоткой для различных моментов времени.

В момент $t=0$ ток в катушке $A-X$ равен нулю, в катушке $B-Y$ отрицателен, в катушке $C-Z$ положителен. Следовательно, в этот момент тока в проводниках A и X нет, в проводниках C и

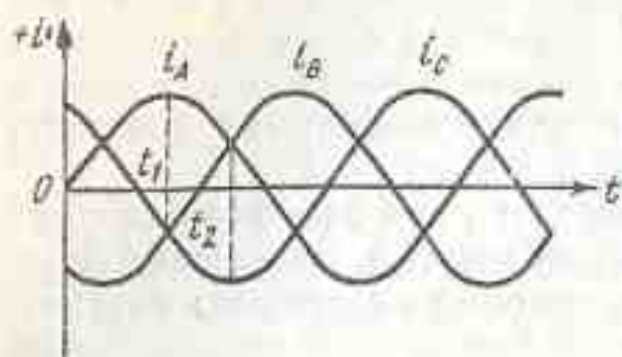


Рис. 71. Кривые изменения токов трехфазной обмотки во времени

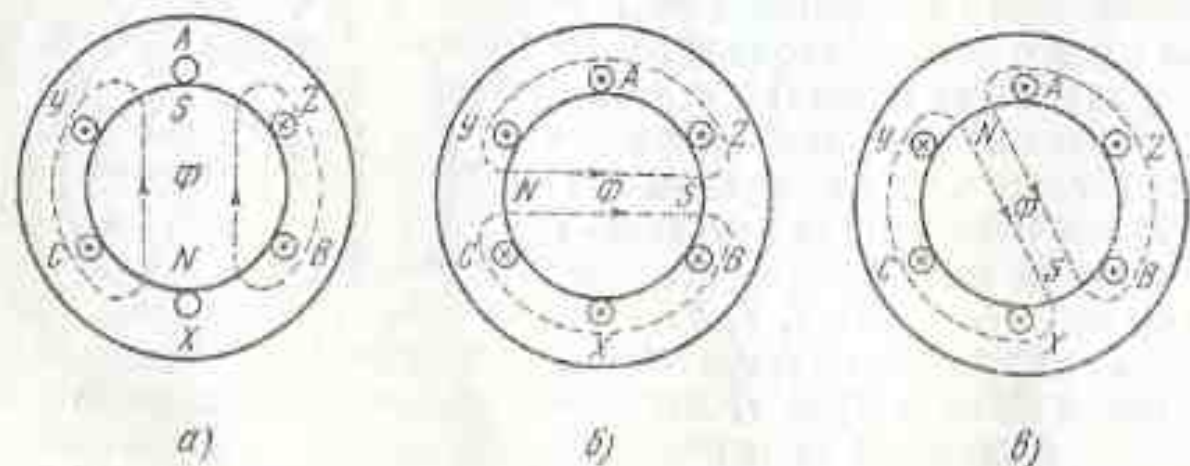


Рис. 72. Магнитное поле трехфазной обмотки в различные моменты времени

Z он имеет положительное направление, а в проводниках B и Y — отрицательное направление (рис. 72, а).

Таким образом, в выбранный нами момент $t=0$ в проводниках C и Y ток направлен на зрителя, а в проводниках B и Z — от зрителя.

При таком направлении тока согласно правилу буравчика магнитные линии созданного магнитного поля направлены снизу вверх, т. е. в нижней части внутренней окружности статора находится северный полюс, а в верхней части — южный.

В момент t_1 в фазе A ток положителен, в фазах B и C — отрицателен. Следовательно, в проводниках Y, A и Z ток направлен на зрителя, а в проводниках C, X и B — от зрителя (рис. 72, б), и магнитные линии магнитного поля повернуты на 90° по часовой стрелке относительно своего начального направления.

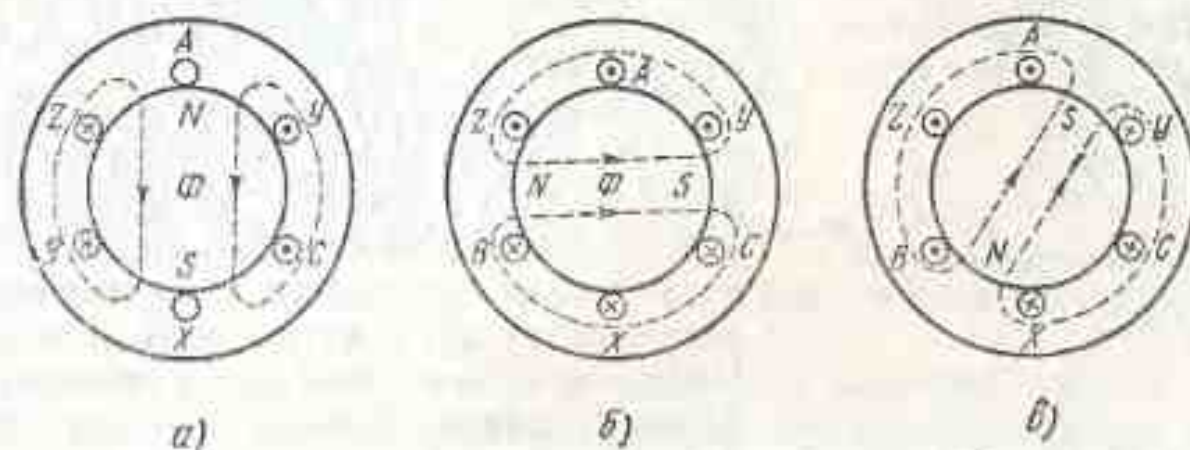


Рис. 73. Магнитное поле трехфазной обмотки в различные моменты времени при изменении чередования фаз

В момент t_2 ток в фазах A и B положителен, а в фазе C — отрицателен. Следовательно, в проводниках A, Z и B ток направлен на зрителя, а в проводниках Y, C и X — от зрителя и магнитные линии магнитного поля повернуты еще на больший угол относительно своего начального направления (рис. 72, в).

Таким образом, во времени происходит непрерывное и равномерное изменение направлений магнитных линий магнитного поля, созданного трехфазной обмоткой, т. е. это магнитное поле вращается с постоянной скоростью.

В нашем случае вращение магнитного поля происходит по часовой стрелке.

Если изменить чередование фаз трехфазной обмотки, т. е. изменить подключение к сети любых двух из трех катушек, то изменится и направление вращения магнитного поля. На рис. 73 показана трехфазная обмотка, у которой изменено подключение катушек B и C к сети. Из направления магнитных линий магнитного поля для ранее выбранных моментов времени $t=0, t_1$ и t_2 видно, что вращение магнитного поля происходит теперь против часовой стрелки.

Магнитный поток, создаваемый трехфазной системой переменного тока в симметричной системе катушек, является величиной постоянной и в любой момент времени равен полуторному значению максимального потока одной фазы.

$$\Phi = \frac{3}{2} \Phi_m.$$

Это можно доказать, определив результирующий магнитный поток Φ для любого момента времени.

Так, для момента t_1 , когда $\omega t_1 = 90^\circ$, токи в катушках принимают следующие значения:

$$i_A = I_m \sin 90^\circ = I_m;$$

$$i_B = I_m \sin (90 - 120) = -\frac{1}{2} I_m;$$

$$i_C = I_m \sin (90 - 240) = -\frac{1}{2} I_m.$$

Следовательно, магнитный поток Φ_A катушки A в выбранный момент имеет наибольшее значение и направлен по оси этой катушки, т. е. положительно. Магнитные потоки катушки B и C вдвое меньше максимального и отрицательны (рис. 74).

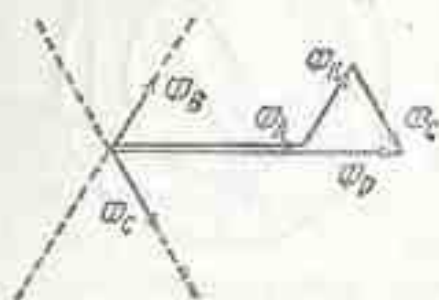


Рис. 74. Результирующий магнитный поток трехфазной обмотки

Геометрическую сумму потоков Φ_A , Φ_B , Φ_C можно найти, построив их последовательно в принятом масштабе в виде отрезков. Соединив начало первого отрезка с концом последнего, получим отрезок результирующего магнитного потока Φ . Численно этот поток будет в полтора раза больше максимального потока одной фазы.

Например, для момента времени t_1 (см. рис. 74) результирующий магнитный поток

$$\Phi_p = \Phi_A + \Phi_B \cos 60^\circ + \Phi_C \cos 60^\circ, \quad (89)$$

так как в этот момент результирующий поток совпадает с потоком Φ_A и сдвинут относительно потоков Φ_B и Φ_C на 60° .

Имея в виду, что в момент t_1 магнитные потоки катушек принимают значения $\Phi_A = \Phi_m$, $\Phi_B = \Phi_C = \frac{1}{2} \Phi_m$, результирующий магнитный поток можно выразить так:

$$\Phi_p = \Phi_m + \frac{1}{2} \Phi_m \cos 60^\circ + \frac{1}{2} \Phi_m \cos 60^\circ = \Phi_m (1 + \cos 60^\circ) = \frac{3}{2} \Phi_m.$$

В момент $t=0$ результирующее магнитное поле было направлено по вертикальной оси (см. рис. 72, а). За время, равное одному периоду изменения тока в катушках, магнитный поток повернется на один оборот в пространстве и будет вновь направлен по вертикальной оси, так же как и в момент $t=0$.

Если частота тока f , т. е. ток претерпевает f периодов изменения в одну секунду, то магнитный поток трехфазной обмотки совершит f оборотов в секунду или $60f$ оборотов в минуту, т. е.

$$n_1 = 60f, \quad (90)$$

где n_1 — число оборотов вращающегося магнитного поля в минуту.

Мы рассмотрели простейший случай, когда обмотка имеет одну пару полюсов.

Если обмотку статора выполнить так, что провода каждой фазы будут разбиты на 2, 3, 4 и т. д. одинаковые группы, симметрично расположенные по окружности статора, то число пар полюсов будет соответственно равно 2, 3, 4 и т. д.

На рис. 75 показана обмотка одной фазы, состоящая из трех симметрично расположенных по окружности статора катушек и образующая шесть полюсов или три пары полюсов.

В многополюсных обмотках магнитное поле за один период изменения тока поворачивается на угол, соответствующий расстоянию между двумя одноименными полюсами.

Таким образом, если обмотка имеет 2, 3, 4 и т. д. пары полюсов, то магнитное поле за время одного периода изменения тока поворачивается на $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$ и т. д. часть окружности статора. В общем случае, обозначив буквой p число пар полюсов, найдем путь, пройденный магнитным полем за один период изменения тока, равным одной p -той доли окружности статора. Следовательно, число оборотов в минуту магнитного поля обратно пропорционально числу пар полюсов, т. е.

$$n_1 = \frac{60f}{p}.$$

Пример 1. Определить число оборотов магнитного поля машины с числом пар полюсов $p=1, 2, 3$ и 4 , работающих от сети с частотой тока $f=50$ гц.

Решение. Число оборотов магнитного поля

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{p} = \frac{3000}{p}.$$

При $p=1$ $n_1 = \frac{3000}{1} = 3000$ об/мин.

При $p=2$ $n_1 = \frac{3000}{2} = 1500$ об/мин.

При $p=3$ $n_1 = \frac{3000}{3} = 1000$ об/мин.

При $p=4$ $n_1 = \frac{3000}{4} = 750$ об/мин.

Пример 2. Магнитное поле машины, включенной в сеть с частотой тока 50 гц, делает 1500 об/мин. Определить число оборотов магнитного поля этой машины, если она будет включена в сеть с частотой тока 60 гц.

Решение. Число пар полюсов машины

$$n_1 = \frac{60f}{p}, \text{ откуда } p = \frac{60f}{n_1} = \frac{3000}{1500} = 2.$$

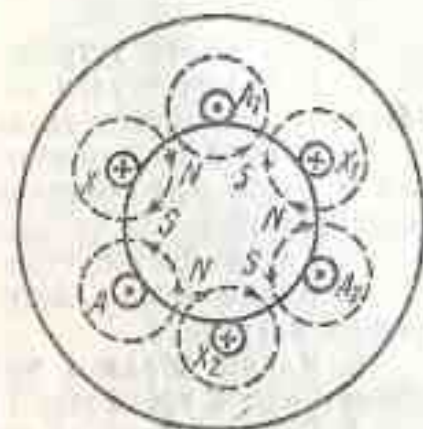


Рис. 75. Схема обмотки статора многополюсной машины

Число оборотов магнитного поля при новой частоте

$$n_2 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 60}{2} = 1800 \text{ об/мин.}$$

Контрольные вопросы

1. Объясните устройство и принцип работы трехфазного генератора.
2. В каком случае не нужен нулевой провод при соединении обмотки генератора и приемников звездой?
3. Каково соотношение между линейными и фазными значениями напряжений и токов при соединении источников и потребителей энергии звездой и треугольником?
4. Какие достоинства имеет схема соединения приемников треугольником?
5. Каким выражением определяется мощность трехфазного тока при симметричной нагрузке?
6. Каким образом можно изменить направление вращения магнитного поля симметричной трехфазной системы катушек?
7. От чего зависит скорость вращения магнитного поля симметричной трехфазной системы?

ГЛАВА VI

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ИЗМЕРЕНИЯ

§ 66. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электрические измерительные приборы служат для измерения различных электрических величин: силы тока, напряжения, сопротивления, мощности, энергии, а также многих неэлектрических величин, в том числе температуры, давления, влажности, скорости, уровня жидкости, толщины материала и др.

В связи с тем, что абсолютно точных приборов нет, показания электроизмерительных приборов несколько отличаются от действительного значения измеряемых величин.

Разность между измеренным и действительным значением величины называется *абсолютной погрешностью прибора*. Если, например, в цепи сила тока $I = 10 \text{ а}$, а амперметр, включенный в эту цепь, показывает $I_{\text{изм}} = 9,85 \text{ а}$, то абсолютная погрешность показания прибора

$$\Delta A = I_{\text{изм}} - I = 9,85 - 10 = -0,15 \text{ а.} \quad (91)$$

Приведенной погрешностью прибора $\gamma_{\text{пр}}$ называется отношение абсолютной погрешности ΔA к наибольшему значению величины $A_{\text{макс}}$, которую можно измерить при данной шкале прибора:

$$\gamma_{\text{пр}} = \frac{\Delta A}{A_{\text{макс}}} \cdot 100\%. \quad (92)$$

Приведенная погрешность прибора, находящегося в нормальных рабочих условиях (температура 20°С , отсутствие вблизи прибора ферромагнитных масс, нормальное рабочее положение шкалы и т. д.), называется *основной погрешностью прибора*.

Пример. Пусть при измерении силы тока $I = 4 \text{ а}$ в нормальных условиях пользовались амперметром со шкалой $0-10 \text{ а}$ и он показывал, что сила тока в цепи $4,1 \text{ а}$. Вычислить основную (приведенную) погрешность прибора, характеризующую его точность.

Решение:

$$\gamma_{\text{пр}} = \frac{\Delta A}{A_{\text{макс}}} \cdot 100 = \frac{4,1 - 4}{10} \cdot 100 = 1\%.$$

В зависимости от допускаемой основной погрешности электроизмерительные приборы делятся на восемь классов точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5; 4.

Цифра класса точности показывает величину допускаемой основной (приведенной) погрешности $\Delta A_{\text{макс}}$ прибора в процентах вне зависимости от знака погрешности.

Класс точности

$$K = \frac{\Delta A_{\text{макс}}}{A_{\text{макс}}} \cdot 100\% \quad (93)$$

Прибор, у которого класс точности выражен меньшим числом, позволяет выполнять измерение с большей точностью.

Зная класс точности прибора и наибольшее значение величины, которую можно измерить данной шкалой прибора, можно определить наибольшую возможную абсолютную погрешность выполненного измерения:

$$\Delta A_{\text{макс}} = \pm \frac{KA_{\text{макс}}}{100} \quad (94)$$

Пример. Допустим, что наибольшая сила тока, которую можно измерить данным амперметром, составляет 15 а, а класс точности прибора $K=4$.

Определить наибольшую возможную абсолютную погрешность при выполнении измерения в любой точке шкалы.

Решение:

$$\Delta A_{\text{макс}} = \frac{KA_{\text{макс}}}{100} = \frac{4 \cdot 15}{100} = 0,6 \text{ а.}$$

Чем ближе измеряемая величина к наибольшему значению, которое позволяет измерить прибор, тем меньше погрешность при прочих равных условиях. Это обстоятельство следует учитывать при выборе предела измерения прибора для выполнения измерения.

Электроизмерительные приборы классифицируются по роду измеряемой величины, принципу действия, степени точности и роду измеряемого тока, кроме того, они делятся на эксплуатационные группы.

По роду измеряемой величины приборы делятся на амперметры, вольтметры, омметры, ваттметры, счетчики, электротермометры, электротахометры (измеряющие число оборотов в минуту) и др.

По принципу действия измерительного механизма приборы могут быть следующих систем: электромагнитной, магнитоэлектрической, электродинамической, ферродинамической, индукционной, выпрямительной, термоэлектрической, электронной, вибрационной и электростатической.

В зависимости от рода тока, для измерения которого предназначены приборы, они делятся на приборы, измеряющие переменный ток, постоянный ток, и приборы, измеряющие переменный и постоянный токи.

Выпускают приборы трех основных эксплуатационных групп: А, Б и В. Условные обозначения электроизмерительных приборов разных эксплуатационных групп приведены в табл. 5.







Таблица 5

Условные обозначения электроизмерительных приборов
По роду измеряемой величины





Название прибора	Измеряемая величина	Условное обозначение
Амперметр	Сила тока	Ⓐ
Вольтметр	Напряжение	Ⓥ
Омметр	Электрическое сопротивление	ⓞ
Ваттметр	Электрическая мощность	Ⓦ
Частотомер	Частота тока	ⓗz

По принципу действия прибора




Система прибора	Условное обозначение
Магнитоэлектрическая	Ⓜ

Система прибора	Условное обозначение
Индукционная	
Термоэлектрическая	
Выпрямительная	
Электромагнитная	
Электродинамическая	
Ферродинамическая	

По роду измеряемого тока

Род тока	Условное обозначение
Переменный	
Постоянный	
Переменный и постоянный	
Трёхфазный	

По положению прибора при измерении

Положение прибора при измерении	Условное обозначение
Вертикальное	
Горизонтальное	
Под углом 30°	

Применение групп приборов

Группа	Температура окружающего воздуха, °С	
A*	От 0 до +35	
B	От -30 до +40	
B	B ₁	От -40 до +50
	B ₂	От -50 до +60

Прочие обозначения	
Наименование	Условное обозначение
Класс точности, например, 1,5	1,5
Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, например, 2000 в	☆
Осторожно! Прочность изоляции измерительной цепи по отношению к корпусу не соответствует нормам	④ ⚡
Год выпуска	1966
Заводской номер	21226
Эксплуатационная группа	△

* Знак группы А на шкале прибора не наносится.

На шкале каждого электронизмерительного прибора условными знаками указаны необходимые сведения о конструкции и эксплуатации прибора. Например, на шкале вольтметра (рис. 76) указано: вольтметр (V) электромагнитной системы; предназначен для измерения переменного напряжения (~) в пределах от 0 до 250 в; при измерениях напряжения прибор следует устанавливать вертикаль-

но (⊥); изоляция испытана напряжением 2 кВ (☆), класс

точности 1,5; заводской номер 5140; год выпуска 1966; эксплуата-

ционная группа △.

К электронизмерительным приборам всех систем предъявляются следующие технические требования:

точность и надежность в работе и низкая стоимость;

потребление по возможности малой мощности;

способность не вносить заметных изменений в электрические параметры измеряемой цепи;

более равномерные деления в пределах рабочей части шкалы;

способность выдерживать возможно большую перегрузку;

продолжительный срок службы без ухудшения своих качеств;

надежная изоляция токоведущих частей от корпуса;

показания практически не должны зависеть от влияния внешних факторов;

стрелки приборов должны быстро устанавливаться у соответствующего деления шкалы.

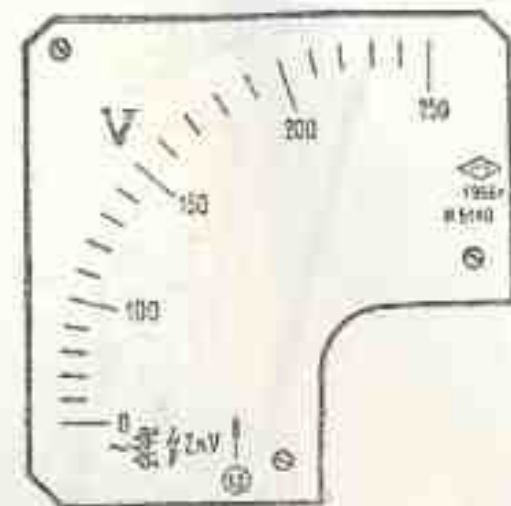


Рис. 76. Шкала вольтметра

§ 67. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРИБОРЫ

Устройство электромагнитного прибора с плоской катушкой показано на рис. 77. Неподвижная часть прибора представляет собой плоскую катушку 1 с обмоткой из изолированной медной проволоки. Концы обмотки присоединяются к зажимам прибора. Подвижная часть прибора имеет ось 4, установленную в подпятниках, на которой помещаются стальной сердечник, стрелка 7 и сегмент успокоителя 2, который находится в магнитном поле постоянного магнита 3. Спиральная пружина 5, создающая противодействующий момент, соединена одним концом с корректором 6, а другим — с осью. В вырезе корректора помещается эксцентричный штифт с головкой винта.

Когда по обмотке катушки протекает электрический ток, создается магнитное поле и стальной сердечник втягивается в катушку. В зависимости от силы тока в обмотке сердечник втягивается в катушку в большей или меньшей степени, поворачивая на некоторый угол ось со стрелкой.

Одновременно с увеличением отклонения подвижной части прибора возрастает противодействующий момент, создаваемый закручиванием спиральной пружины. При определенном положении

подвижной части измерительного прибора противодействующий момент полностью уравнивает вращающий момент, а стрелка по шкале прибора указывает измеряемую величину.

При выключении тока стрелка под действием спиральной пружины 5 возвращается в исходное положение.

Втягивание сердечника происходит независимо от того, какой ток (постоянный или переменный) протекает по обмотке. В том и другом случае ток возбуждает магнитное поле, действующее на сердечник, а последний при переменном токе соответственно перемещается. Поэтому электромагнитные приборы пригодны для измерения как в цепях постоянного, так и в цепях переменного тока.

Для установки стрелки на нуль служит корректор 6. При повороте эксцентричного штифта он действует на нижнее плечо корректора и отклоняет его. Верхняя часть корректора, перемещаясь, тянет за собой спиральную пружину, которая поворачивает ось вместе со стрелкой и устанавливает последнюю на нуль.

Чтобы при измерениях стрелка прибора возможно быстрее останавливалась у соответствующего деления шкалы, предусмотрено специальное

Рис. 77. Устройство электромагнитного прибора с плоской катушкой

устройство — успокоитель. Наиболее часто применяют магнитоиндукционные и воздушные успокоители.

Действие магнитоиндукционного успокоителя основано на использовании вихревых токов. При перемещении алюминиевого сегмента-успокоителя между полюсами постоянного магнита в сегменте возникают вихревые токи. Взаимодействие магнитного поля постоянного магнита и вихревых токов создает согласно правилу Ленца необходимое торможение (успокоение) сегмента, а следовательно, и всей подвижной части прибора со стрелкой.

Действие воздушного успокоителя основано на использовании сопротивления воздуха, которое встречает подвижное легкое крыло, перемещающееся внутри закрытого сосуда.

Конструкция электромагнитного прибора с круглой катушкой показана на рис. 78. Неподвижная часть прибора представляет собой круглую катушку с обмоткой. Внутри ее укреплен неподвижный стальной сердечник. Подвижной частью прибора служит ось, к которой прикреплен подвижный стальной сердечник. На оси уста-

новлена стрелка, перемещающаяся вдоль шкалы. С осью через спиральную пружину соединен корректор.

Когда по обмотке катушки протекает ток, концы сердечников намагничиваются с одинаковой полярностью и в результате этого подвижный сердечник, отталкиваясь от неподвижного, поворачивает ось со стрелкой на некоторый угол.

Электромагнитные приборы используются преимущественно для измерений переменных токов и напряжений промышленной частоты.

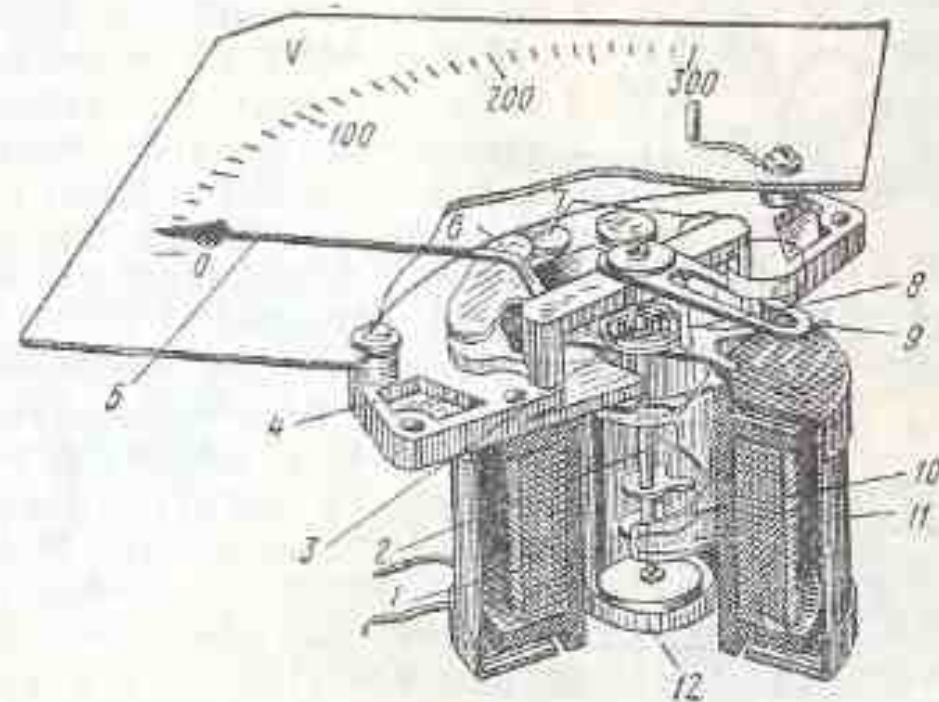


Рис. 78. Устройство электромагнитного прибора с круглой катушкой:

1 — катушка, 2 — ось, 3 — противодействующая пружина, 4 — обойма с успокоителем, 5 — стрелка, 6 — сегмент-успокоитель, 7 — магниты успокоителя, 8 — пружинодержатель, 9 — корректор, 10 — ярмо, 11 — неподвижный сердечник, 12 — алюминиевый стаканчик

К достоинствам этих приборов относятся простота устройства, дешевизна и надежность в эксплуатации, пригодность для измерения постоянного и переменного тока, высокая устойчивость к кратковременным перегрузкам. Недостатками их являются неравномерность начальной части шкалы, зависимость показаний от влияния внешних магнитных полей, сравнительно большая потребляемая мощность.

§ 68. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Магнитоэлектрический прибор (рис. 79) состоит из постоянного магнита $N-S$, магнитопровода из мягкой стали 1, полюсных наконечников 5, стального цилиндра 8 и легкой алюминиевой рамки 7, на которую намотана тонкая изолированная проволока. К рамке, установленной на двух полюсах, прикреплен стрелкодержатель 3 со стрелкой 2 и балластными грузиками 6. Рамка связана с проти-

воздействующими пружинами 4. Для установки стрелки на нуль служит корректор.

Работа прибора основана на воздействии магнитного поля постоянного магнита на ток, протекающий по обмотке рамки, в результате этого рамка поворачивается в направлении, зависящем от направления тока.

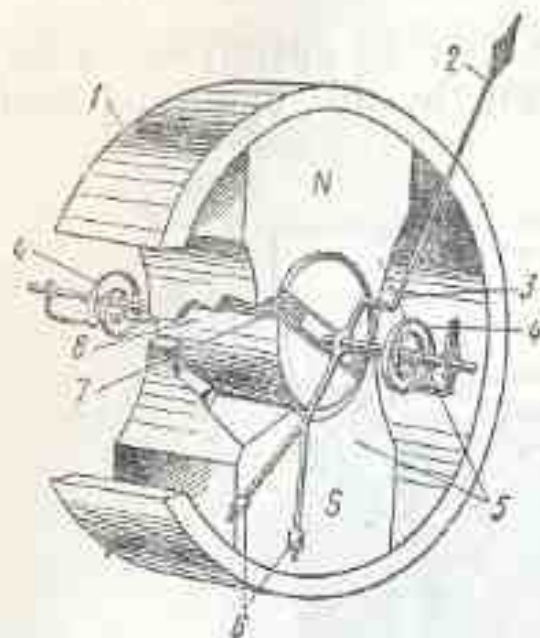


Рис. 79. Устройство магнито-электрического прибора

На зажимах приборов магнито-электрической системы имеются обозначения «+» и «-», которые указывают, как надо включать прибор, чтобы стрелка отклонилась вдоль шкалы.

При вращении алюминиевой рамки в магнитном поле постоянного магнита в рамке, как в витке, индуцируется ток. Взаимодействие этого тока с магнитным полем обеспечивает успокоение колебаний подвижной части прибора при ее отклонении.

К достоинствам приборов магнито-электрической системы относятся: высокая точность, малое собственное потребление мощности, равномерность шкалы, независимость показаний от влияния внешних магнитных полей; а к

недостаткам — непригодность для непосредственного измерения переменного тока, сравнительно высокая стоимость и чувствительность к перегрузкам.

§ 69. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Термоэлектрические измерительные приборы служат преимущественно для измерений переменных токов высокой частоты (до 25 Мгц).

Принцип действия такого прибора основан на использовании двух явлений: 1) выделении тепла при прохождении электрического тока по проводнику; 2) появлении постоянной э. д. с. при нагревании места спая термопары.

Термоэлектрический измерительный прибор представляет собой сочетание гальванометра магнитоэлектрической системы с термопреобразователем, состоящим из нагревателя и термопары. Схема прибора термоэлектрической системы приведена на рис. 80.

Измеряемый переменный ток протекает по нагревателю 1, который выделяет тепло, нагревающее место спая 2 термопары. На холодных концах термопары образуется тер-

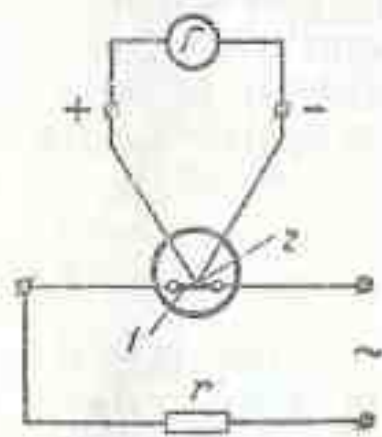


Рис. 80. Схема прибора термоэлектрической системы

мо-э. д. с., под действием которой в цепи гальванометра возникает измеряемый им электрический ток. Нагреватель с термопарой называют термопреобразователем. Он помещается в одном корпусе с гальванометром или отдельно от него.

Так как величина термо-э. д. с., возникающей на холодных концах термопары, зависит от тока, протекающего по нагревателю, то стрелка гальванометра показывает по шкале, отградуированной в единицах тока, силу протекающего в цепи переменного тока.

Термоэлектрические приборы изготовляют в виде щитовых и переносных. Главным их недостатком является малая перегрузочная способность термопреобразователя — они выдерживают перегрузку по току примерно в 1,5 раза.

§ 70. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Основными частями электродинамического прибора (рис. 81) являются: неподвижная катушка 2 и подвижная катушка 1, расположенная на оси 6, к которой прикреплена стрелка 5. Ось связана с алюминиевым крылом воздушного успокоителя 4, помещающегося в камере 3. Ток к подвижной катушке подводится через спиральные пружины 7, создающие противодействующий момент. С нижней пружиной соединен корректор 8.

Работа приборов электродинамической системы основана на взаимодействии токов в двух обмотках. Сила этого взаимодействия поворачивает подвижную обмотку вместе с осью и стрелкой. Угол поворота зависит от силы тока, протекающего по обмоткам, и силы противодействия спиральных пружин.

Электродинамические приборы можно применять в цепях постоянного и переменного тока. Это объясняется тем, что изменение направления переменного тока происходит одновременно в обеих катушках, вследствие чего направление силы взаимодействия между ними остается неизменным.

Электродинамические приборы употребляют для измерения силы тока, напряжения и мощности.

К преимуществам приборов этой системы наряду с возможностью использования их в цепях постоянного и переменного тока относится высокая точность. Недостатками их являются: влияние внешних магнитных полей на результаты измерения, большое

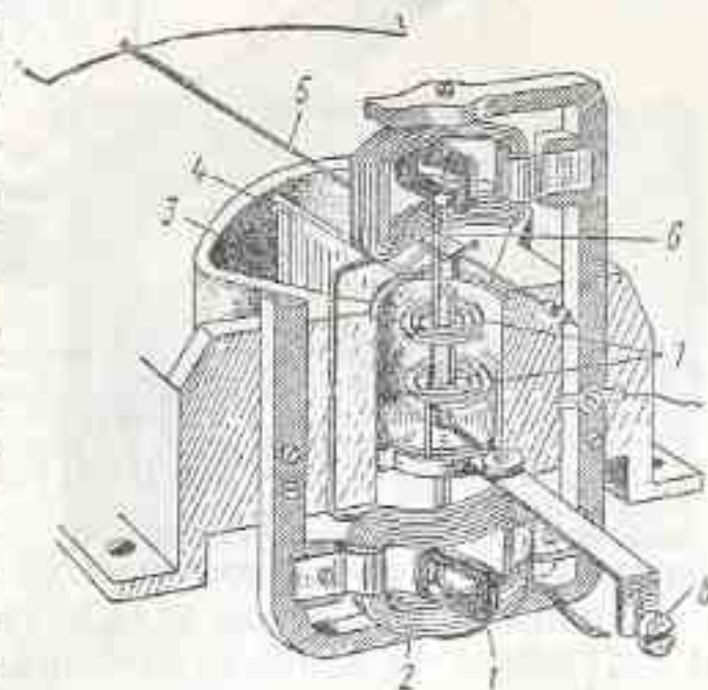


Рис. 81. Устройство электродинамического прибора

собственное потребление мощности, относительно малая устойчивость к перегрузкам, малая чувствительность и высокая стоимость.

Разновидностью приборов электродинамической системы являются широко распространенные, главным образом в качестве щитовых ваттметров, ферродинамические приборы (рис. 82), действие которых основано на том же принципе. Однако в отличие от приборов электродинамической системы у ферродинамических приборов

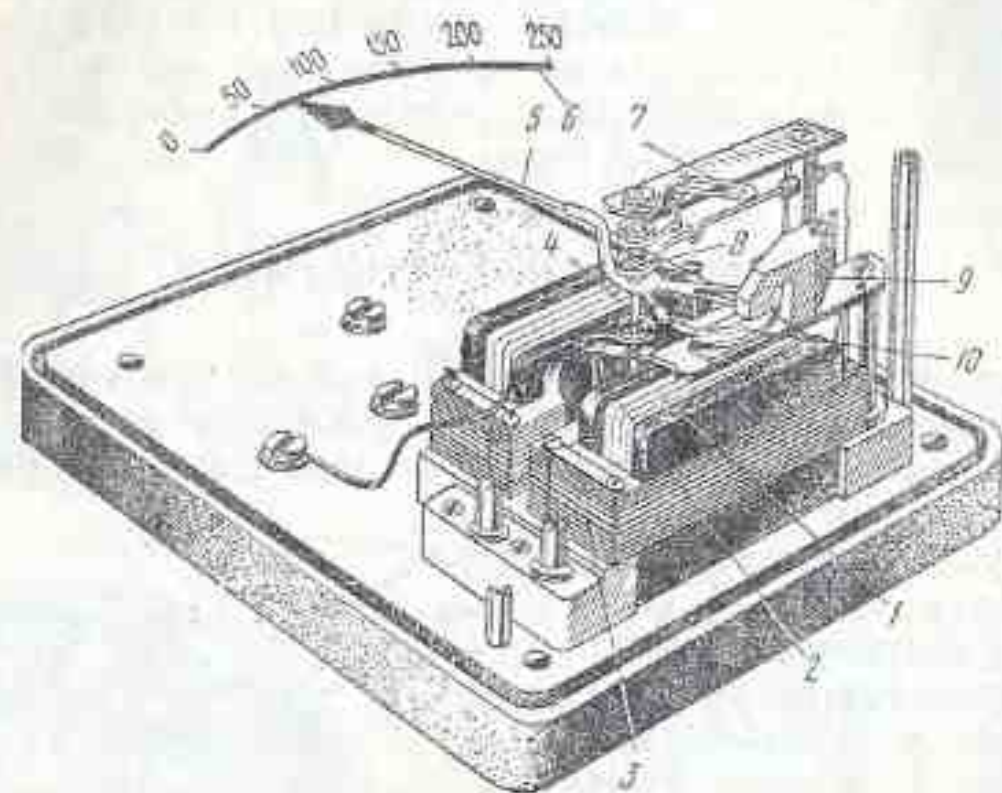


Рис. 82. Устройство ферродинамического прибора:

1 — неподвижные обмотки, 2 — подвижные обмотки, 3 — стальной сердечник, 4 — ось, 5 — стрелка, 6 — шкала, 7 — корректор, 8 — противодействующие пружины, 9 — магнит успокоителя, 10 — алюминиевый сегмент успокоителя.

неподвижные обмотки помещаются на стальном сердечнике, который усиливает магнитное поле и вращающий момент прибора, а также уменьшает влияние внешних магнитных полей на его показания. Катушки электродинамических приборов соединяются между собой в зависимости от их назначения. В амперметрах катушки в большинстве случаев соединяют параллельно, в вольтметрах — последовательно, а в ваттметрах одна катушка включается в цепь последовательно, как амперметр, а другая — параллельно нагрузке, как вольтметр.

§ 71. ИНДУКЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ

К приборам индукционной системы относится счетчик (рис. 83), служащий для учета потребления электрической энергии. Основная часть счетчика — магнитная система 1 с двумя обмотками. Одна обмотка включается в цепь последовательно, а другая — параллельно. Переменные токи, протекающие по каждой обмотке, возбуждают переменные магнитные потоки, которые образуют вра-

щающееся магнитное поле. Эти потоки пронизывают алюминиевый диск 6 счетчика и индуцируют в нем вихревые токи. Воздействие вращающегося магнитного поля, образованного магнитными потоками, на вихревые токи приводит диск во вращение. Ось 2 диска через шестерни 3 передает движение счетному механизму 4. Для торможения диска служит постоянный магнит 5.

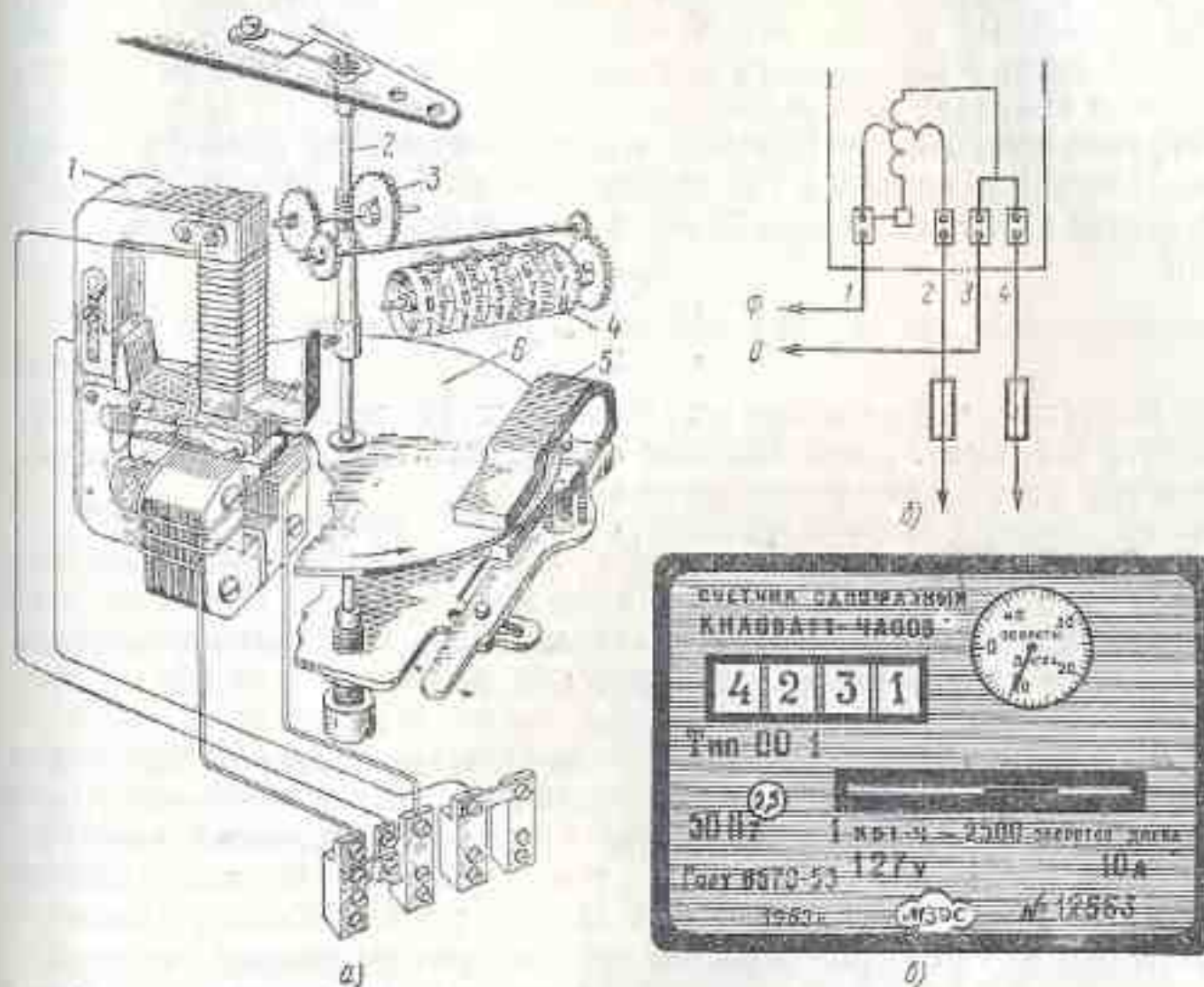


Рис. 83. Счетчик электрической энергии:

а — устройство, б — схема, в — табличка счетчика

Воздействие магнитного поля на вихревые токи пропорционально произведению мгновенных значений тока и напряжения, т. е. пропорционально мощности, следовательно, на диск действует вращающий момент, пропорциональный мощности:

$$M_{вр} = K_{вр} P,$$

где $K_{вр}$ — постоянный коэффициент.

Диск счетчика при своем вращении проходит между полюсами постоянного тормозного магнита 5 и пересекает его магнитные линии. В результате этого постоянный магнит также индуцирует в диске вихревые токи. Взаимодействие магнитного поля постоянного магнита и вихревых токов создает необходимое торможение диска, пропорциональное скорости его вращения.

§ 72. ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЫ ТОКА. РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЕРМЕТРА

Для измерения силы тока в электрических цепях служат амперметры, миллиамперметры и микроамперметры различных систем. Их включают в цепь последовательно, и через прибор проходит весь ток, протекающий в цепи.

При различных электрических измерениях весьма важно, чтобы измерительный прибор как можно меньше изменял электрический режим цепи, в которую его включают. По этой причине амперметр должен обладать незначительным сопротивлением по сравнению с сопротивлением цепи. Пусть в электрическую цепь включен источник электрической энергии, напряжение которого $U=10$ в. Сопротивление потребителя $r_n=20$ ом. В этой цепи, согласно закону Ома, ток

$$I = \frac{U}{r_n} = \frac{10}{20} = 0,5 \text{ а.}$$

Допустим, что обмотка миллиамперметра, которым следует измерить ток, имеет сопротивление $r_a=30$ ом. Тогда при включении прибора в цепь в ней установится ток

$$I = \frac{U}{r_n + r_a} = \frac{10}{20 + 30} = \frac{10}{50} = 0,2 \text{ а.}$$

Таким образом, если включить в цепь прибор с большим сопротивлением, то нарушится ее электрический режим и сила тока будет измерена с ошибкой на 0,3 а.

Этот пример подтверждает, что желательно измерять силу тока в цепи таким прибором, у которого собственное сопротивление наименьшее. Присоединять амперметр к полюсам источника тока без нагрузки нельзя. Это объясняется тем, что по обмотке амперметра, имеющей малое сопротивление, в данном случае пройдет большой ток и она может перегореть. По той же причине нельзя включать амперметр параллельно нагрузке. По обмотке и отдельным элементам электроизмерительных приборов некоторых систем во избежание возможности их порчи нельзя пропустить сколько-нибудь значительный ток. В частности, это относится к спиральным пружинам и подвижной катушке магнитоэлектрического прибора.

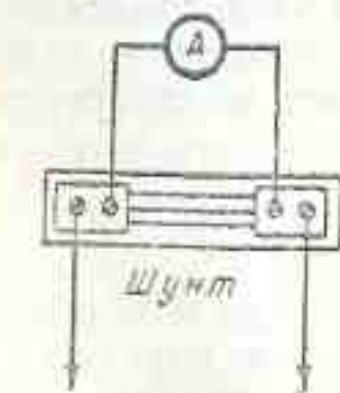


Рис. 84. Схема соединения амперметра с шунтом.

Если такой измерительный прибор нужно приспособить для измерения значительной силы тока — расширить пределы измерения амперметра, то он снабжается шунтом.

Шунт — это относительно малое, но точно известное сопротивление ($r_{ш}$), присоединяемое параллельно измерительному механизму. Схема включения амперметра с шунтом показана на рис. 84. При таком включении шунта из n частей тока, протекающего в цепи, через прибор проходит лишь одна его часть, а через шунт — осталь-

ные $n-1$ частей. Это происходит потому, что сопротивление шунта меньше сопротивления амперметра в $n-1$ раз. Число n показывает, во сколько раз нужно увеличить предел измерения амперметра. Таким образом, шунт служит для расширения пределов измерения прибора.

Пусть амперметр позволяет измерять силу тока $I_a=5$ а, а в данном случае необходимо этим прибором измерить силу тока $I=30$ а. Значит, нужно увеличить предел измерения прибора в

$n = \frac{I}{I_a} = \frac{30}{5} = 6$ раз. Сопротивление шунта, который надо присоединить параллельно амперметру, чтобы обеспечить такое расширение предела измерения, можно определить по формуле:

$$r_{ш} = \frac{r_a}{n-1}. \quad (95)$$

Если сопротивление амперметра $r_a=0,15$ ом, то сопротивление шунта

$$r_{ш} = \frac{0,15}{6-1} = 0,03 \text{ ом.}$$

После присоединения шунта к прибору каждое деление шкалы прибора будет соответствовать величине, в n раз большей, чем указана на ней. В нашем случае, если стрелка прибора с шунтом установится на делении 5, это значит, что в цепи протекает ток $I=5 \cdot n = 5 \cdot 6 = 30$ а.

Шунт должен иметь четыре зажима, это необходимо для устранения влияния на сопротивление шунта переходных сопротивлений контактов. Шунты изготовляют из манганина — сплава, у которого температурный коэффициент сопротивления практически равен нулю.

§ 73. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ. РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛЬТМЕТРА

Для измерения напряжения служат вольтметры, милливольтметры и микровольтметры различных систем. Эти приборы включают параллельно нагрузке, а потому сопротивление их должно быть как можно больше. В связи с этим уменьшается достоверность произведенного измерения.

Для расширения пределов измерения вольтметра к обмотке измерительного механизма последовательно присоединяют многоомное сопротивление, носящее название *добавочного сопротивления* (r_d). Схема включения вольтметра с добавочным сопротивлением приведена на рис. 85.

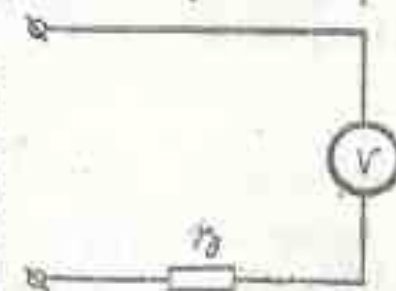


Рис. 85. Схема соединения вольтметра с добавочным сопротивлением.

При такой схеме из n частей напряжения, подлежащего измерению, на обмотку прибора приходится лишь одна часть, а остальные

$n - 1$ частей — на добавочное сопротивление. Это происходит потому, что сопротивление r_d берется больше сопротивления вольтметра в $n - 1$ раз, а при последовательном соединении напряжение распределяется пропорционально величине сопротивления.

Добавочное сопротивление

$$r_d = r_v(n - 1). \quad (96)$$

Общее измеренное напряжение равно сумме падения напряжения на этих сопротивлениях.

Число n показывает, во сколько раз расширяют предел измерения вольтметра.

Пусть имеющийся у нас вольтметр позволяет измерять напряжение $U_v = 30$ в, а необходимо измерить этим прибором напряжение $U = 120$ в. Значит, нужно расширить предел его измерения в

$$n = \frac{U}{U_v} = \frac{120}{30} = 4 \text{ раза.}$$

Добавочное сопротивление, которое надо присоединить последовательно к вольтметру, можно определить по формуле

$$r_d = r_v(n - 1).$$

Если сопротивление вольтметра $r_v = 3000$ ом, то для расширения предела измерения прибора в 4 раза необходимо, чтобы добавочное сопротивление

$$r_d = r_v(n - 1) = 3000(4 - 1) = 9000 \text{ ом.}$$

После присоединения к вольтметру добавочного сопротивления каждое деление шкалы прибора будет соответствовать величине, в n раз большей, чем указано на ней. Например, в нашем случае, если стрелка прибора установится на цифре 30, то это будет означать, что напряжение

$$U = 30 \cdot n = 30 \cdot 4 = 120 \text{ в.}$$

Добавочные сопротивления изготовляют чаще всего из манганина или константана. Оба эти материала имеют большое удельное сопротивление и малый температурный коэффициент сопротивления.

Шунты и добавочные сопротивления могут быть установлены внутри корпуса прибора или подключаться к его зажимам на время измерений.

§ 74. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Для измерения сопротивлений служит омметр. Возможность измерения сопротивления основана на том, что при постоянном напряжении сила тока в электрической цепи зависит от сопротивления. Эта зависимость позволяет по величине тока в цепи судить о ее сопротивлении. Стрелка омметра показывает на шкале величину сопротивления присоединенного к зажимам прибора.

Схема магнитоэлектрического омметра показана на рис. 86. Пользуясь этой схемой, объясним, как по отклонению рамки прибора можно судить о величине измеряемого сопротивления.

Пусть внутреннее сопротивление прибора, состоящее из сопротивления обмотки и добавочного r_d , равно 2250 ом. Отклонение

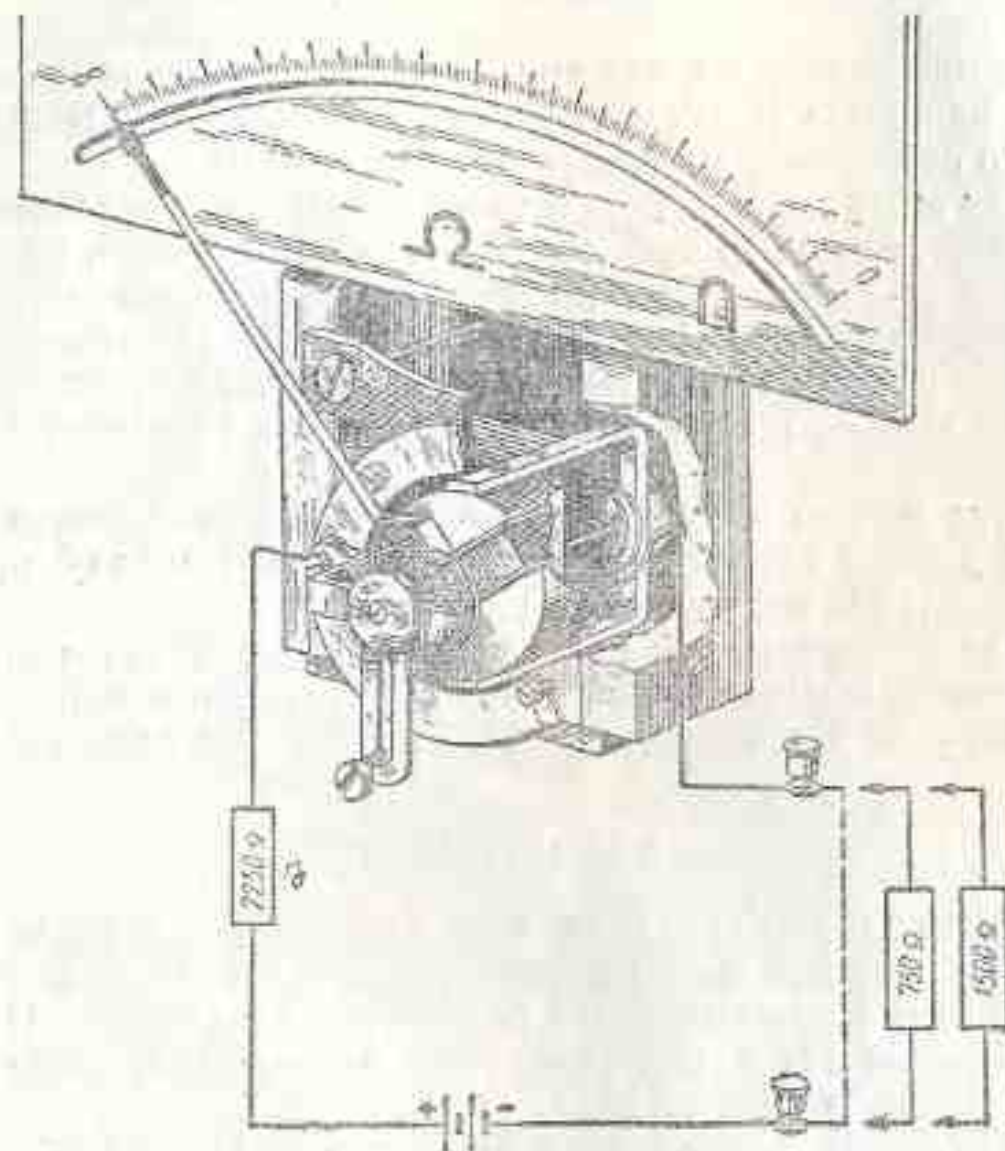


Рис. 86. Упрощенная схема магнитоэлектрического омметра

стрелки прибора на всю шкалу происходит при подключении напряжения 4,5 в. Включим в цепь прибора батарею с таким напряжением U и замкнем зажимы (на рисунке показано пунктиром).

Ток в обмотке рамки определим по закону Ома:

$$I = \frac{U}{r} = \frac{4,5}{2250} = 0,002 \text{ а.}$$

Ток, равный 0,002 а, отклоняет рамку со стрелкой до конца шкалы. Так как это отклонение происходит при внешнем сопротивлении, равном нулю, то против точки отклонения стрелки на шкале ставим нуль.

Не изменяя напряжения источника тока, присоединим к зажимам сопротивление $r = 750$ ом и снимем перемычку, показанную на рисунке пунктиром. Тогда полное сопротивление цепи будет:

$$2250 + 750 = 3000 \text{ ом.}$$

Увеличение общего сопротивления на 750 ом вызовет уменьшение тока, отклоняющего рамку, и поэтому угол ее отклонения станет меньше. Новое, меньшее отклонение стрелки пометим на шкале цифрой 750 ом, соответственно величине присоединенного внешнего сопротивления.

Теперь присоединим к зажимам прибора другое внешнее сопротивление, например 1500 ом. Стрелка отклонится еще меньше. Обозначим это отклонение на шкале цифрой 1500 ом.

Проводя опыт дальше, будем увеличивать сопротивление и отмечать соответствующими цифрами отклонения стрелки, пока она не остановится в самом начале шкалы. Это произойдет тогда, когда внешнее сопротивление будет так велико, что практически ток в цепи станет равным нулю. Над делением, соответствующим отсутствию тока в цепи, поставим знак бесконечно большого сопротивления.

Разметка шкалы измерительного прибора называется *градуйровкой*. В данном случае мы проградуйровали шкалу прибора в омах и можем им пользоваться как омметром.

Еще раз напомним, что показания стрелки будут соответствовать действительным величинам внешнего сопротивления только в том случае, если источник тока имеет неизменное напряжение.

§ 75. МЕГОММЕТР

По правилам эксплуатации электрических установок низкого напряжения сопротивление изоляции участка цепи должно быть не ниже 1000 ом на каждый вольт рабочего напряжения. Например, при напряжении 127 в сопротивление изоляции провода должно быть $127 \cdot 1000 = 127\,000 \text{ ом} = 127 \text{ ком}$.

Для измерения сопротивления изоляции электрических цепей, обмоток электрических машин и электроустановок служат мегомметры (приборы, измеряющие миллионы ом) — переносные приборы магнитоэлектрической системы.

Мегомметр (рис. 87) состоит из двух основных частей: измерительного устройства и генератора постоянного тока с ручным приводом.

Измерительное устройство прибора представляет собой магнитоэлектрический гальванометр, на подвижной оси которого имеется не одна рамка с обмоткой, как у обычного прибора этой системы, а две рамки, расположенные под некоторым углом одна относительно другой.

По обмотке одной рамки мегомметра протекает ток, пропорциональный силе тока в измеряемой цепи, а по обмотке второй рамки — ток, пропорциональный напряжению. Таким образом, угол поворота стрелки мегомметра зависит от токов, протекающих по двум обмоткам прибора. Согласно закону Ома сила тока в каждой обмотке зависит от сопротивления цепи. Поэтому отклонение

стрелки мегомметра пропорционально измеряемому сопротивлению, к которому подключается прибор.

Из сказанного следует, что мегомметр сочетает в себе амперметр и вольтметр и выполняет «сам» вычисление сопротивления по формуле $r = \frac{U}{I}$, стрелка прибора показывает на шкале величину измеряемого сопротивления.

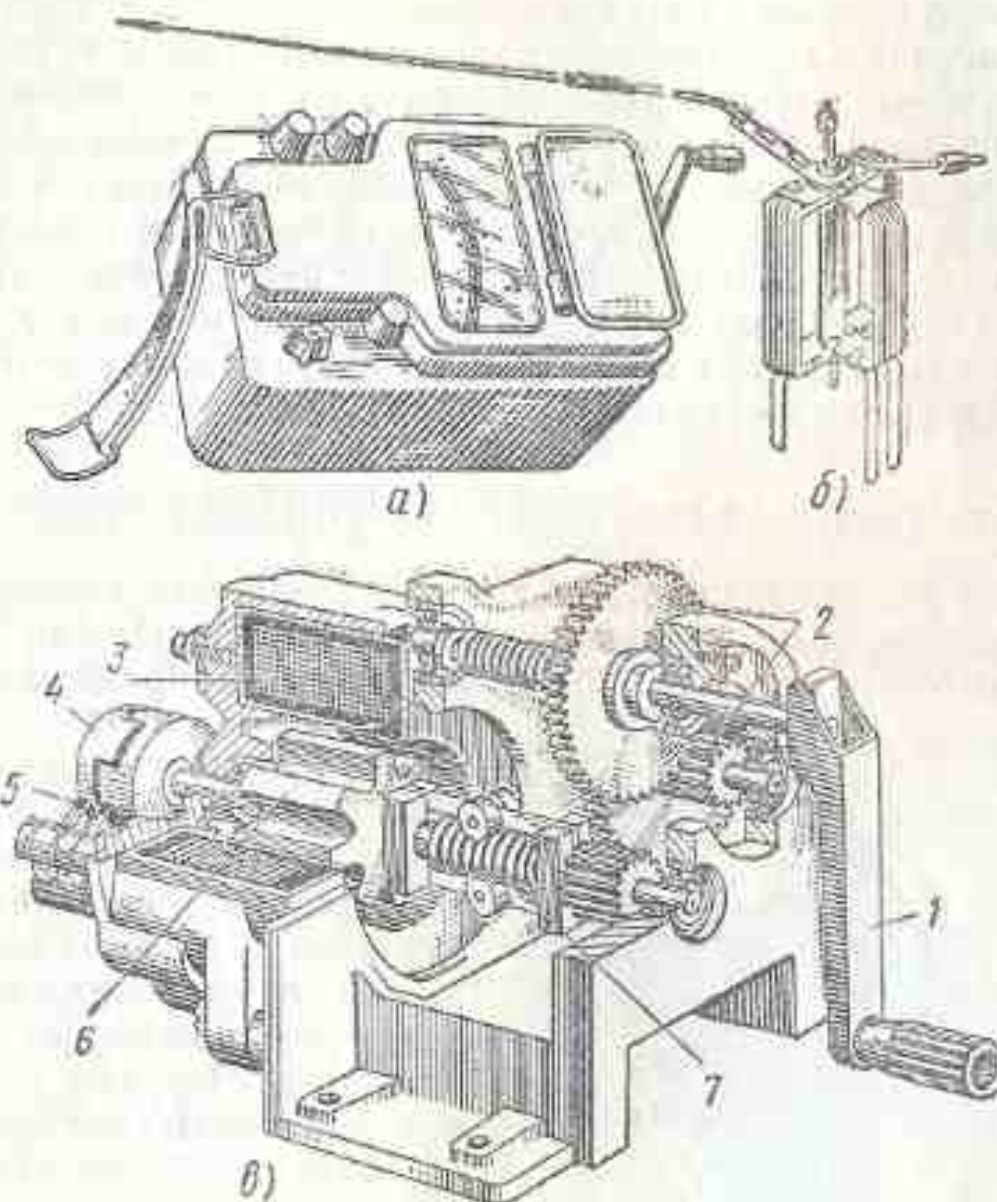


Рис. 87. Мегомметр:

а — внешний вид, б — обмотка мегомметра, в — генератор

При вращении рукоятки 1 (см. рис. 87, в) приходит во вращение зубчатая передача 2, многополюсный магнит ротора 6 и регулятор скорости генератора 7. При вращении магнита ротора его магнитный поток пересекает витки обмотки 3 статора и в ней наводится э. д. с., которая через коллектор 4 и щетки 5 поступает в схему прибора.

Для проверки мегомметра перед измерением его устанавливают в горизонтальное положение, а зажимы («Линия» и «Земля») прибора соединяют между собой. Вращая рукоятку генератора со скоростью 120 об/мин, проверяют, совпадает ли стрелка мегомметра

с нулевым делением шкалы. Затем при разомкнутых зажимах вращают рукоятку генератора с той же скоростью. При этом стрелка прибора должна установиться на отметку со знаком ∞ .

Чтобы измерить сопротивление изоляции между двумя проводами, следует отключить их от сети и присоединить один провод к зажиму «Линия», а другой — к зажиму «Земля». Вращая рукоятку генератора мегомметра, можно определить сопротивление изоляции по положению стрелки на шкале прибора.

При измерении сопротивления изоляции между обмотками двигателя поступают так: снимают переключки с панели зажимов двигателя и соединяют конец первой обмотки с зажимом «Линия», а конец второй обмотки — с зажимом «Земля» мегомметра.

Вращая рукоятку прибора, определяют по шкале сопротивление изоляции между обмотками. Если необходимо измерить сопротивление изоляции обмотки двигателя по отношению к земле, то соответственно присоединяют обмотку к зажиму «Линия» мегомметра, а корпус — к зажиму «Земля».

§ 76. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРИБОР

Широкое распространение получили переносные универсальные электронизмерительные многопредельные приборы — ампервольт-омметры, которые могут измерять силу тока, напряжение, сопротивление.



Рис. 88. Универсальный электронизмерительный прибор

На рис. 88 изображен внешний вид миллиампервольтметра, позволяющего измерять: величину постоянного тока, постоянное и переменное напряжение и сопротивление. Так как прибор измеряет амперы, вольты и омы, его иногда сокращенно называют авометром.

Циферблат прибора имеет три шкалы. Верхняя шкала обозначена « Ω » и предназначена для измерения сопротивления. Средняя шкала со знаком « \sim » служит для отсчета величин переменного напряжения. Нижняя шкала, около которой стоит знак « \Rightarrow », дает возможность определить вели-

чину постоянного тока и напряжения.

Схема прибора составлена так, что позволяет при измерении тока включать в цепь различные шунты, при измерении напряжения — добавочные сопротивления, а при измерении переменного напряжения — полупроводниковый выпрямитель.

Прибор снабжен двумя гибкими разноцветными проводами с

наконечниками — штеккерами. Одни концы проводов при помощи штеккеров вставляются в гнезда, расположенные на лицевой панели прибора, а другие включаются в цепь, в которой измеряется ток, напряжение или сопротивление.

§ 77. МОСТ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Для измерения сопротивления и других электрических величин широко используются измерительные мосты (рис. 89).

Переменные сопротивления r_1 , r_2 и r_4 образуют плечи моста. Плечо моста r_3 является неизвестным измеряемым сопротивлением ($r_3 = r_x$). Плечи моста образуют две параллельные ветви. В ветвь ABD включены сопротивления r_1 и r_3 , которые соединены последовательно. Ветвь ACD состоит из сопротивлений r_2 и r_4 , также соединенных последовательно. В диагональ моста BC (мостовая ветвь) включен гальванометр магнитоэлектрической системы, а в диагональ AD — источник постоянного тока напряжением U .

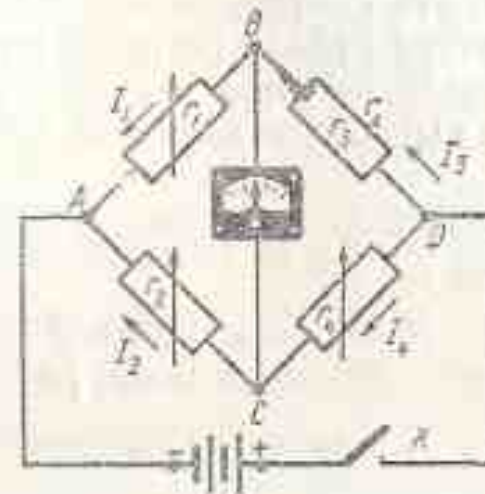


Рис. 89. Принципиальная схема моста для измерения сопротивления

Подбором величин сопротивлений r_1 , r_2 и r_4 можно добиться того, что в цепи гальванометра (в мостовой ветви) на участке BC тока не будет. В этом случае говорят, что мост уравновешен. Когда в гальванометре ток равен нулю, потенциал точек B и C равны между собой. Если в точках B и C потенциал различный, то через гальванометр потечет ток и мост уравновешен не будет.

Потенциалы в точках B и C будут равны в том случае, когда на участках AB и CA будет одинаковое падение напряжения.

Это равенство можно записать так:

$$I_1 r_1 = I_2 r_2,$$

но при этом условии должны быть равны между собой и напряжения на участках BD и CD . Запишем это равенство:

$$I_3 r_3 = I_4 r_4.$$

Разделим первое равенство на второе и получим пропорцию

$$\frac{I_1 r_1}{I_2 r_2} = \frac{I_3 r_3}{I_4 r_4}.$$

Сопротивления r_1 и r_3 соединены последовательно и поэтому токи I_1 и I_3 равны между собой. Сопротивления r_2 и r_4 также соединены последовательно и, следовательно, токи I_2 и I_4 также равны.

Произведя сокращение в пропорции равных токов, получим:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{r_4},$$

отсюда определим неизвестное сопротивление $r_x = r_3$:

$$r_x = \frac{r_1}{r_2} r_4. \quad (97)$$

В связи с тем что величины сопротивлений r_1 , r_2 и r_4 моста известны, подставим их значения в формулу (97) и определим величину неизвестного сопротивления r_x .

Для измерения сопротивления таким мостом необходимо: подключить к зажимам r_x моста неизвестное сопротивление, а к зажимам «+» и «-» подключить источник постоянного тока; установить соотношение плеч моста r_1 и r_2 , включить гальванометр и подобрать сопротивление плеча моста r_4 так, чтобы стрелка гальванометра стояла на нулевом делении (это укажет на то, что мост уравновешен); подставить в формулу (97) известные величины r_1 , r_2 и r_4 и вычислить величину измеряемого сопротивления.

§ 78. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ И ЭНЕРГИИ

Мощность постоянного тока, потребляемая данным участком электрической цепи, равна произведению напряжения на силу тока:

$$P = IU. \quad (98)$$

Для определения мощности необходимо включить в цепь вольтметр и амперметр и показания приборов перемножить.

Мощность постоянного и переменного тока можно также измерить ваттметром электродинамической системы (рис. 90).

Неподвижная обмотка ваттметра, имеющая малое сопротивление, включается в цепь последовательно (как амперметр), а подвижная обмотка, имеющая большое сопротивление, — параллельна нагрузке (как вольтметр).

Показания электродинамического ваттметра при измерении мощности переменного тока пропорциональны произведению напряжения на силу тока и коэффициент мощности:

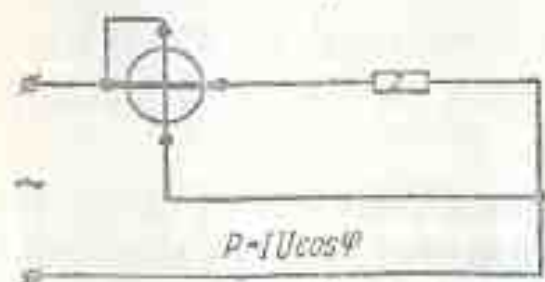
$$P = IU \cos \varphi. \quad (99)$$

Для измерения расхода электрической энергии переменного тока применяют индукционные счетчики.

Счетчик включают в цепь по схеме (см. рис. 83, б). Как и при



а)



б)

Рис. 90. Ваттметр:
а — общий вид, б — схема включения

включении ваттметра одна обмотка счетчика включается в цепь последовательно, а вторая — параллельно нагрузке.

Провода сети присоединяются к зажимам 1 и 3, а провода, идущие через плавкие предохранители к нагрузке, подключают к зажимам 2 и 4.

На таблице счетчика указано, на какое напряжение, силу тока и частоту он рассчитан, в каких единицах измеряет энергию, какому количеству оборотов диска соответствует расход энергии в 1 кВт·ч.

Для подсчета энергии за некоторый промежуток времени необходимо знать начальное и конечное показания счетчика. Разность этих показаний определяет количество использованной электроэнергии.

Если, например, начальное показание счетчика было 603 кВт·ч, а конечное — 790 кВт·ч, то расход составляет:

$$790 - 603 = 187 \text{ кВт·ч.}$$

Стоимость 1 кВт·ч энергии 4 коп., стоимость всей израсходованной энергии

$$187 \cdot 4 = 748 \text{ коп., или 7 р. 48 к.}$$

§ 79. ПОНЯТИЕ ОБ ИЗМЕРЕНИИ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Электроизмерительная техника по сравнению с другими видами измерительных устройств обладает большей надежностью, точностью, дешевизной и простотой.

По этим причинам электроизмерительные приборы широко применяют для измерения неэлектрических величин.

Основными частями электрической системы, служащей для измерения неэлектрических величин, являются преобразователь (датчик), промежуточные устройства и индикатор. Сущность электрических измерений неэлектрических величин заключается в том, что датчик преобразует неэлектрическую величину, например изменение уровня жидкости, температуры, скорости движения и т. п., в изменение электрической величины сопротивления, тока или напряжения, которое измеряется индикатором, представляющим собой обычный электроизмерительный прибор.

Рассмотрим устройство некоторых электрических датчиков и примеры их применения для электрических измерений неэлектрических величин.

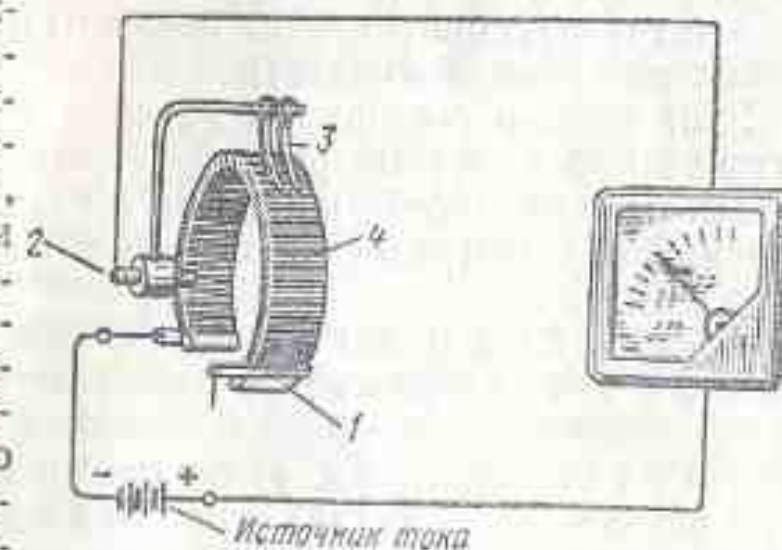


Рис. 91. Принцип действия резисторного датчика

Резисторный датчик (рис. 91) представляет собой изогнутую (или прямую) пластину 1 из изоляционного материала, на которую намотана проволока 4 из материала с большим удельным сопротивлением. При повороте оси 2 подвижный контакт-щетка 3 датчика перемещается по проволоке, в результате чего изменяется ее сопротивление, что соответственно воздействует на показания электроизмерительного прибора.

Резисторный датчик используют для измерения уровня жидкости в баке.

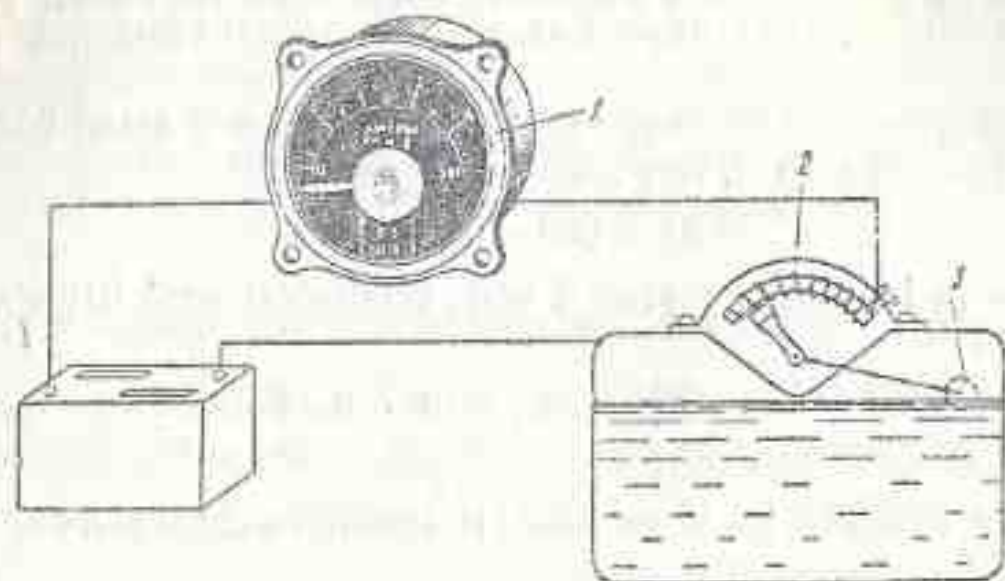


Рис. 92. Схема прибора для измерения уровня жидкости

Действие прибора, предназначенного для определения количества жидкости в баке (рис. 92), основано на использовании резисторного датчика, сопротивление которого меняется при повышении или понижении уровня жидкости.

Этот прибор состоит из датчика 2 и индикатора 1. Ползунок датчика через систему рычагов скреплен с поплавком 3, находящимся на поверхности жидкости в баке. Индикатором служит прибор магнитоэлектрической системы, шкала которого проградуирована в литрах.

Когда в баке много жидкости, поплавок перемещается вверх. Вместе с ним передвигается щетка датчика, сопротивление которого уменьшается. Ток в цепи возрастает, и стрелка индикатора отклоняется на большой угол, указывая по шкале количество жидкости. При опускании поплавка сопротивление датчика увеличивается, ток в цепи становится меньше и стрелка прибора отклоняется влево, указывая, что в баке мало жидкости.

Электроконтактные датчики служат для преобразования механического перемещения измерительного штока, соприкасающегося с поверхностью контролируемого объекта, в замыкание или размыкание электрической цепи. Наиболее простым электроконтактным датчиком является однопредельный, который имеет одну пару контактов. Многопредельные датчики с несколькими парами контактов могут одновременно контролировать несколько различных объектов.

На рис. 93 приведена схема устройства и действия электроконтактного датчика, используемого для измерения размеров деталей. Измерительный шток 1 под действием пружины 2 стремится выдвигаться из корпуса датчика вниз.

Если геометрический размер контролируемой детали 3 больше заданного, измерительный шток поднимается, размыкает контакт 4 и замыкает контакт 5. При нахождении под штоком изделия с размером меньше заданной величины контакт 5 размыкается и замыкается контакт 4. При нормальном размере контролируемой детали контакты 4 и 5 остаются разомкнутыми.

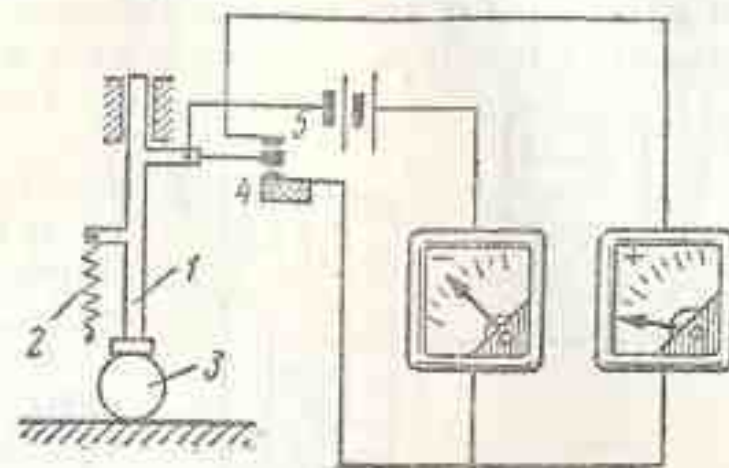


Рис. 93. Устройство электроконтактного датчика

К датчику можно присоединить электроизмерительные приборы. Отклонение стрелки одного прибора соответствует большему размеру детали, а другого — меньшему размеру. Положение стрелок у нулевого деления означает, что под щупом датчика проходят детали заданных размеров.

Вместо электроизмерительных приборов можно подключить к датчику электромагнитные счетчики, при помощи которых учитывается количество деталей брака — большего и меньшего размеров.

Счетчики можно заменить разноцветными сигнальными лампами.

Индукционные датчики преобразуют неэлектрические величины в индуктированную э. д. с., которая измеряется электроизмерительным прибором.

В индукционном датчике (рис. 94) катушка 1, помещенная на сердечнике 2, перемещается в зазоре постоянного магнита 3 (или электромагнита) и в ней индуктируется э. д. с.

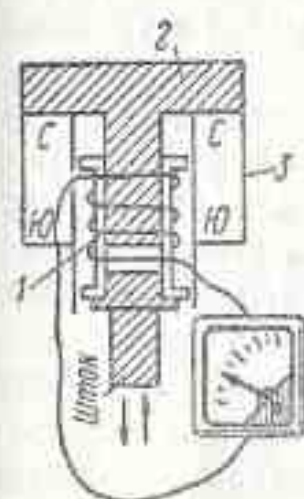


Рис. 94. Устройство индукционного датчика

Для автоматического контроля размеров детали в процессе ее обработки на станке применяют виброконтактный прибор с индукционным датчиком. Он позволяет значительно увеличить производительность станков, облегчает труд рабочих, резко сокращает брак.

Схема устройства виброконтактного прибора приведена на рис. 95. Деталь обрабатывается шлифовальным кругом 7. Размеры обрабатываемой детали контролируются датчиком-щупом 6, выполненным в виде рычага. Щуп прижимается к детали 8 под действием плоской пружины 5. Когда по электромагниту 4 пропускают переменный ток, выступ щупа то притягивается к сердечнику

этого электромагнита, то отходит от него. При этом щуп получает колебательные движения по вертикали (100 раз в секунду).

Верхний конец щупа соединен с намагниченным от постоянного магнита 2 сердечником 3 второго электромагнита, обмотка которого соединена с электроизмерительным прибором — индикатором 1. Шкала индикатора отградуирована в миллиметрах.

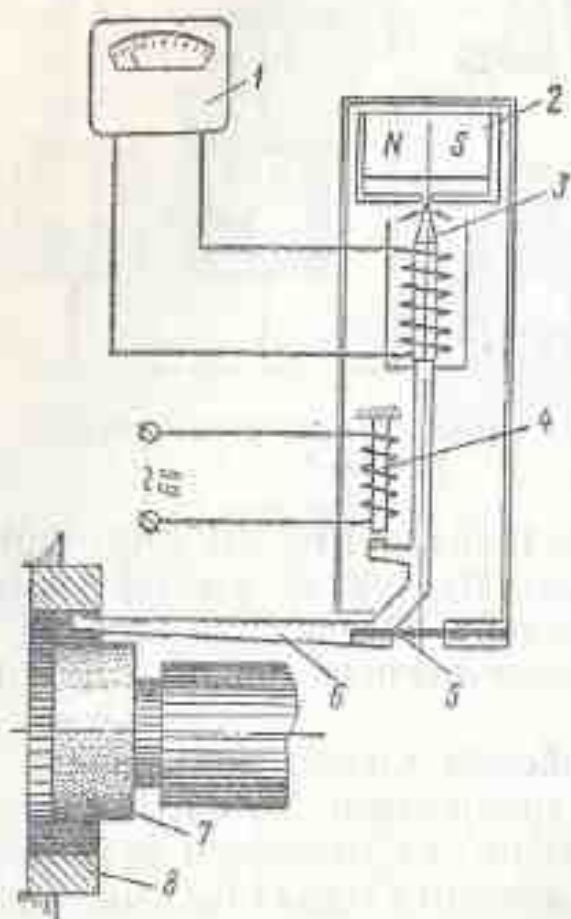


Рис. 95. Устройство виброконт-
тактного прибора для автоматиче-
ского контроля размеров де-
тали

При колебаниях щупа магнитное поле сердечника 3 пересекает витки электромагнита и в ней индуцируется э. д. с., под действием которой по обмотке измерительного прибора начинает проходить ток.

Когда щуп подводят к обрабатываемой детали, его рабочая часть ударяет о ее поверхность. По мере обработки детали размах колебаний щупа изменяется, а вместе с этим меняются индуцируемая в электромагните э. д. с. и сила тока в индикаторе. По положению стрелки на шкале индикатора рабочий следит за размером обрабатываемой детали.

Такой прибор может работать автоматически и в момент достижения заданного размера через специальное устройство остановить станок.

Для измерения скорости вращения вала применяют электрические тахометры. Они состоят из индукционного датчика и индикатора. Датчик представляет собой маленький генератор электрической энергии. Напряжение, даваемое этим генера-

тором, изменяется пропорционально скорости вращения его оси. К зажимам датчика присоединяется индикатор-вольтметр, шкала которого отградуирована в единицах скорости.

Чтобы определить скорость вращения вала машины, ось датчика соединяют с валом при помощи зубчатой или иной передачи. В обмотке датчика индуцируется э. д. с., пропорциональная скорости вращения вала. Ее величину показывает стрелка на шкале прибора.

Для измерения температуры используется зависимость величины э. д. с. термопары от температуры нагрева места ее спая.

На рис. 96 показан термоэлектрический измеритель температуры. Он состоит из датчика 1 в виде термопары и индикатора 2 — электроизмерительного прибора, шкала которого отградуирована в градусах температуры. Этим электротермометром можно измерять температуру, например, в пределах от 0 до 100°С.

На рис. 97 показана схема использования пьезоэлектрического датчика для измерения давления.

Через трубку 1 пьезоэлектрического манометра пар, давление которого необходимо измерить, воздействует на мембрану 2 и через шайбу 3 передается на две пластинки 4 пьезоэлектрика из кварца. При сжатии кварца на его концах, соединенных с электродом 6, появляется отрицательный электрический заряд, а на противоположных концах кварцевых пластинок, соединенных с корпусом 5, — положительный заряд.

Электрод 6 и корпус 5 манометра проводниками соединя-

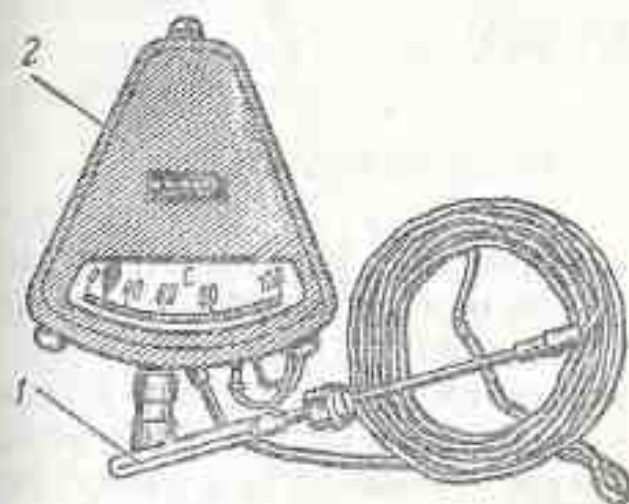


Рис. 96. Термоэлектрический измери-
тель температуры

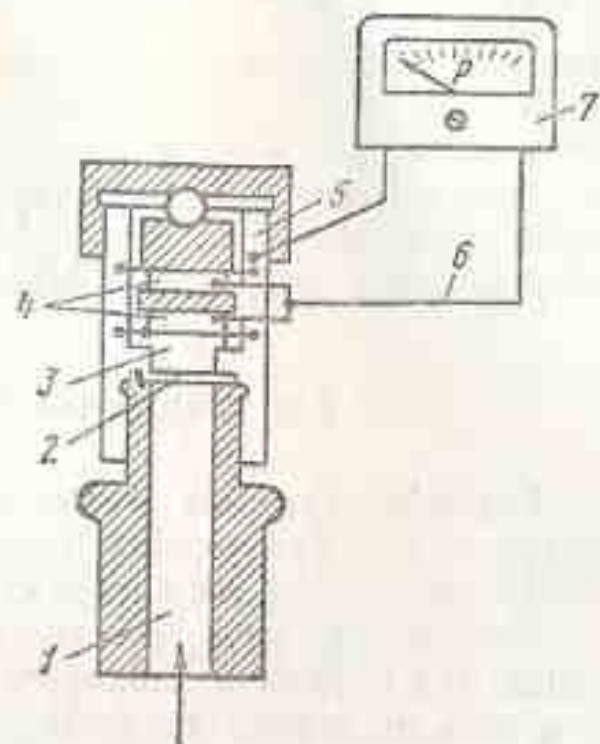


Рис. 97. Пьезоэлектрический манометр

ются с индикатором — электроизмерительным прибором 7, шкала которого отградуирована в единицах измерения давления.

Этот прибор измеряет величину зарядов, возникающих на кварцевых пластинках, а следовательно, и давление.

Пьезоэлектрические манометры пригодны для измерения больших и очень малых давлений. Это связано с тем, что ничтожно малое количество электричества, появляющееся на концах пьезоэлектриков при весьма малых давлениях, можно подать на усилитель, а затем измерить электроизмерительным прибором.

Контрольные вопросы

1. Какими приборами измеряется сила тока, напряжение и сопротивление?
2. Назовите преимущества приборов электромагнитной системы.
3. На каком принципе основано действие приборов магнитоэлектрической системы?
4. Для чего к амперметру подключают шунт?
5. По какой формуле можно вычислить величину добавочного сопротивления, присоединяемого к вольтметру?
6. Какими приборами измеряют расход электрической энергии?
7. Для чего служат датчики?
8. Изобразите схему включения ваттметра.
9. По какой формуле вычисляется неизвестное сопротивление, измеренное мостом, при его электрическом равновесии?

ГЛАВА VII ТРАНСФОРМАТОРЫ

§ 80. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТРАНСФОРМАТОРАХ

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, преобразующий переменный ток одного напряжения в переменный ток той же частоты, но другого напряжения.

Трансформаторы получили очень широкое практическое применение для передачи электрической энергии на большие расстояния для распределения энергии между ее приемниками и в различных выпрямительных, сигнализационных, усилительных и других устройствах.

При передаче электрической энергии от электростанций к ее потребителям большое значение имеет величина тока, протекающего по проводам. В зависимости от силы тока выбирается сечение проводов линии передачи энергии и, следовательно, определяется стоимость проводов, а также и потери энергии в них.

Если при одной и той же передаваемой мощности увеличить напряжение, то ток в той же мере уменьшится, а это позволит применять провода с меньшим поперечным сечением для устройства линии передачи электрической энергии и уменьшит расход цветных металлов, а также уменьшит потери мощности в линии.

Поперечные сечения проводов и потери мощности в них определяются следующими выражениями:

$$q = \frac{I}{\delta} = \frac{UI}{\delta U} = \frac{P}{\delta U}; P_x = I^2 r = I \rho l \delta = \frac{P}{U} \rho l \delta,$$

так как

$$r = \rho \frac{l}{q} = \rho \frac{l \delta}{I},$$

где q — поперечное сечение провода, мм²,

I — сила тока, а,

δ — плотность тока, а/мм²,

U — напряжение в линии электропередачи, в,

P — передаваемая мощность, вт,

P_x — потери мощности в линии электропередачи, вт,

r — сопротивление провода, ом,

l — длина линии, м,

ρ — удельное сопротивление материала провода, $\frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$.

Таким образом, при неизменной передаваемой мощности поперечное сечение провода и потери мощности в линии обратно пропорциональны напряжению.

Электрическая энергия вырабатывается на электростанциях синхронными генераторами при напряжении 11—18 кВ (в некоторых случаях при 30—35 кВ). Хотя это напряжение очень велико для непосредственного его использования потребителями, однако оно недостаточно для экономичной передачи электроэнергии на большие расстояния. Для увеличения напряжения применяют повышающие трансформаторы.

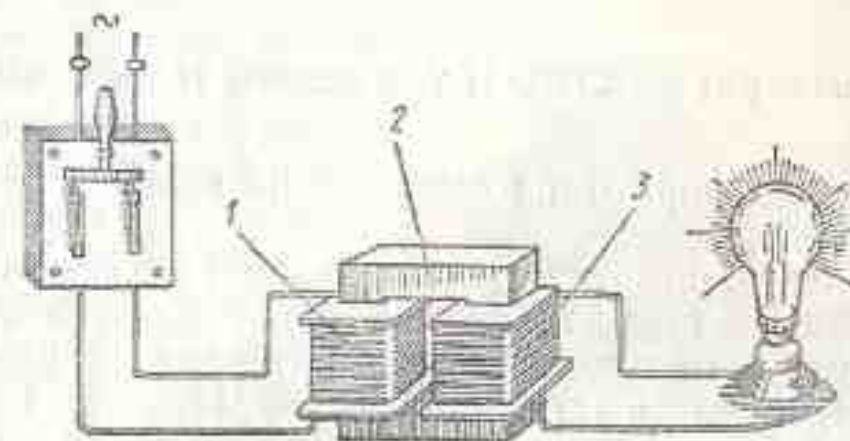


Рис. 98. Схема трансформатора:
1 — первичная обмотка, 2 — стальной сердечник,
3 — вторичная обмотка

Приемники электрической энергии (лампы накаливания, электродвигатели и т. д.) из соображений безопасности для лиц, пользующихся этими приемниками, рассчитываются на более низкое напряжение (110—380 в). Кроме того, высокое напряжение требует усиленной изоляции токоведущих частей, что делает конструкцию аппаратов и приборов очень сложной. Поэтому высокое напряжение, при котором передается энергия, не может непосредственно использоваться для питания приемников, вследствие чего к потребителям энергия подводится через понижающие трансформаторы.

Таким образом, электрическая энергия при передаче от места ее производства к месту потребления трансформируется несколько раз (3—4 раза). Кроме того, понижающие трансформаторы в распределительных сетях включаются одновременно и не всегда на полную мощность, вследствие чего мощности установленных трансформаторов значительно больше (в 7—8 раз) мощностей генераторов, вырабатывающих электроэнергию на электростанциях.

На рис. 98 изображена принципиальная схема трансформатора; для ясности обмотки его помещены на разных стержнях стального сердечника. В действительности каждая обмотка располагается на

обоих стержнях так, что половины двух обмоток находятся на левом, а вторые половины — на правом стержнях сердечника. При таком размещении обмоток достигается лучшая магнитная связь между ними, вследствие чего уменьшаются потоки рассеяния, которые не участвуют в процессе трансформирования энергии.

Обмотка, включенная в сеть источника электрической энергии, называется *первичной*; обмотка, от которой энергия подается к приемнику, — *вторичной*.

Обычно напряжения первичной и вторичной обмоток неодинаковы.

Если первичное напряжение меньше вторичного, то трансформатор называется *повышающим*, если же первичное напряжение больше вторичного, то *понижающим*. Любой трансформатор может быть использован и как повышающий, и как понижающий.

§ 81. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И УСТРОЙСТВО ТРАНСФОРМАТОРА

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции.

Если первичную обмотку трансформатора включить в сеть источника переменного тока, то по ней будет протекать переменный ток I_0 (ток холостого хода), который возбудит в сердечнике трансформатора переменный магнитный поток. Магнитный поток, пронизывая витки вторичной обмотки трансформатора, будет индуцировать в этой обмотке э. д. с. Если вторичную обмотку замкнуть на какой-либо приемник энергии (на рис. 98 — лампа накаливания), то под действием индуцируемой э. д. с. E_2 по этой обмотке и через приемник энергии будет протекать ток I_2 . Одновременно и в первичной обмотке появится нагрузочный ток I' , который в сумме с током холостого хода I_0 определит ток первичной обмотки I_1 . Таким образом, электрическая энергия, трансформируясь, будет передаваться из первичной сети во вторичную, но при другом напряжении, на которое рассчитан приемник энергии, включенный во вторичную сеть.

Для улучшения магнитной связи между первичной и вторичной обмотками они помещаются на стальном магнитопроводе.

Для уменьшения потерь от вихревых токов магнитопроводы трансформаторов собираются из тонких пластин (толщиной 0,5 и 0,35 мм) трансформаторной стали, покрытых изоляцией (жаростойким лаком).

Материалом магнитопровода является трансформаторная сталь Э-42; Э-43; Э-43А; Э-320; Э-330; Э-330А и др.

В настоящее время осуществляется полный переход на сталь Э-330А. Марки электротехнических сталей обозначают: буква Э — сталь электротехническая; первые цифры после буквы (1, 2, 3, 4) — степень легированности стали (1 — слаболегированная, 2 — среднелегированная, 3 — высоколегированная, 4 — высоколегированная); вторые цифры — гарантированные свойства стали (удельные потери в стали при частоте 50 гц: нормальные — 1; понижен-

ные — 2 и низкие — 3); А — особо низкие удельные потери в стали, 0 — сталь холоднокатаная.

Холоднокатаная сталь имеет высокую магнитную проницаемость (больше, чем у горячекатаной) в направлении, совпадающем с направлением проката, тогда как поперек проката магнитная проницаемость относительно низкая. Поэтому магнитопроводы из холоднокатаной стали делают так, чтобы магнитные линии замыкались по направлению проката стали. Магнитопроводы трансформаторов малой мощности изготавливают из ленты холоднокатаной стали.

В настоящее время ленточные разрезные магнитопроводы трансформаторов получают следующим образом: половину магнитопроводов изготавливают из полос холоднокатаной стали различной длины так, что полосы укладываются в пакет ступенями. В специальных формах пакеты на прессе выгибаются в половины (верхнюю и нижнюю) магнитопровода и отжигаются для снятия остаточных механических напряжений. После пропитки в клеящем составе (для склейки отдельных листов) половины магнитопроводов подвергаются механической обработке (для фрезеровки стыков) и направляются на сборку.

При сборке трансформатора обмотки устанавливают на магнитопроводе, и половины магнитопроводов (верхняя и нижняя) составляются и стягиваются, причем предварительно места стыков покрывают специальным клеящим составом.

В трансформаторах больших мощностей магнитопроводы собираются из полос стали. Холоднокатаную сталь разрезают так, чтобы направление магнитных линий в собранном магнитопроводе совпадало с направлением прокатки стали. У горячекатаной стали магнитная проницаемость одинакова во всех направлениях и при малых мощностях магнитопроводы собираются из пластин Ш или П-образной формы, которые штампуются из листовой стали.

В зависимости от формы магнитопровода и расположения обмоток на нем трансформаторы могут быть стержневыми и броневыми. Магнитопровод стержневого однофазного трансформатора имеет два стержня, на которых помещены его обмотки (рис. 99, а). Эти стержни соединены ярмом с двух сторон так, что магнитный поток замыкается по стали. Магнитопровод броневый однофазного трансформатора (рис. 99, б) имеет один стержень, на котором полностью

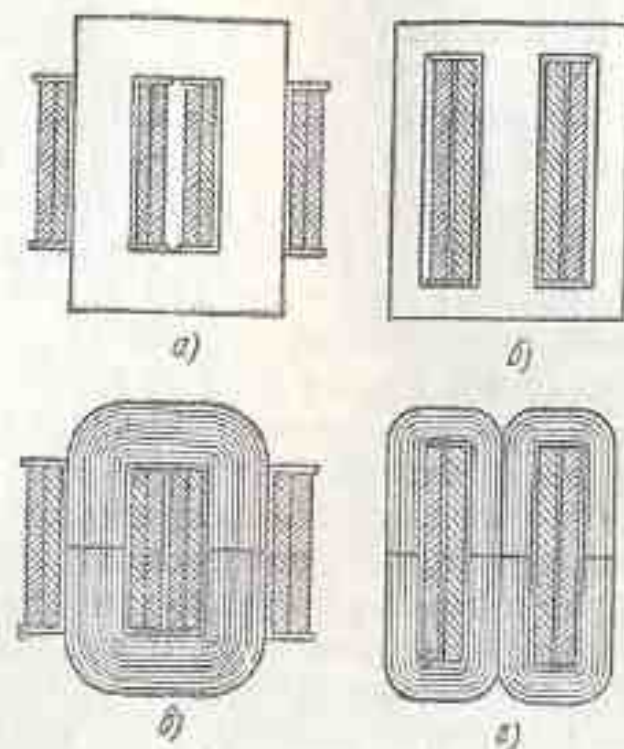


Рис. 99. Магнитопроводы однофазных трансформаторов:
а — стержневой, б — броневой, в — ленточный стержневой, г — ленточный броневой

помещены обмотки трансформатора. Стержень с двух сторон охватывается (бронировается) ярмом так, что обмотка частично защищена сердечником от механических повреждений.

Ленточные магнитопроводы из холоднокатаной стали подобны стержневым (рис. 99, в) или броневым (рис. 99, а).

Трансформаторы большой мощности в настоящее время изготавливают исключительно стержневыми, так как у них проще изоляция обмоток высшего напряжения от сердечника, чем в броневых. В трансформаторах малой мощности напряжения обмоток малы, а поэтому изоляция их от сердечника значительно упрощается.

Трансформаторы малой мощности часто изготавливают с броневым магнитопроводом, который имеет только один комплект с двумя обмотками, тогда как у стержневого — два комплекта.

Магнитный поток в броневоом магнитопроводе, выходя из стержня, разветвляется на две равные части так, что магнитный поток, замыкающийся через ярмо, вдвое меньше, чем в стержне, вследствие чего сечение ярма делают вдвое меньшим, чем сечение стержня.

Часто выполняют сердечники трансформаторов с уширенным ярмом, в которых поперечное сечение ярма больше поперечного сечения стержня. Это дает возможность уменьшить магнитную индукцию в ярме, снижает потери в стали и уменьшает потребление трансформаторами реактивных намагничивающих токов из сети.

Для измерительных и лабораторных трансформаторов, а также при повышенной частоте применяют тороидальные (кольцеобразные) магнитопроводы, достоинством которых является относительно малое магнитное сопротивление и почти полное отсутствие внешнего потока рассеяния. При равномерном распределении обмоток по окружности тороида такие трансформаторы не чувствительны к внешним магнитным полям независимо от их направления. Тороидальные магнитопроводы изготавливают из ленты холоднокатаной стали, а обмотки наматываются на специальном станке челночного типа.

Обмоткам трансформатора придают преимущественно форму цилиндрических (круглых) катушек, концентрически напызываемых на стержень магнитопровода. При такой форме обмотки лучше противостоят радиальным механическим усилиям, возникающим во время работы трансформатора. В некоторых случаях по ряду соображений применяют катушки более сложной формы — прямоугольные, овальные и др. При малых токах обмотки наматываются из медного или алюминиевого изолированного провода круглого поперечного сечения. При больших токах применяют провод прямоугольного поперечного сечения, наматываемый в одну или несколько параллелей.

Расположение цилиндрических обмоток показано на рис. 100. Ближе к стержню магнитопровода располагается обмотка низшего напряжения *НН*, так как ее легче изолировать от магнитопровода, чем обмотку высшего напряжения *ВН*. Обмотку низшего напряжения изолируют от магнитопровода прокладками, рейками, шайбами и другими изоляционными деталями (чаще из электрокартона).

Обмотку высшего напряжения изолируют от обмотки низшего напряжения.

При цилиндрических обмотках поперечному сечению магнитопровода желательно придать круглую форму, так как в этом случае в площади, охватываемой обмотками, не остается промежутков, не заполненных сталью. Чем меньше незаполненных промежутков, тем меньше длина витков обмоток, и, следовательно, вес обмоточного провода при заданной площади поперечного сечения магнитопровода.

Однако магнитопроводы круглого поперечного сечения не делают. Для изготовления магнитопровода круглого сечения надо его собрать из большого числа стальных листов различной ширины, что потребует большого числа штампов. Поэтому у трансформаторов большой мощности магнитопровод имеет ступенчатое поперечное сечение с числом ступеней не более 9—10. Число ступеней сечения сердечника определяется числом углов в одной четверти круга. На рис. 100 показано три ступени поперечного сечения магнитопровода.

Для лучшего охлаждения в магнитопроводах мощных трансформаторов устраивают охлаждающие каналы в плоскостях, параллельных и перпендикулярных плоскости стальных листов. Охлаждающие каналы устраивают и в обмотках.

В трансформаторах малой мощности поперечное сечение магнитопровода имеет прямоугольную форму и обмоткам придают форму прямоугольных катушек. При малых токах радиальные механические усилия, возникающие при работе трансформатора и действующие на обмотки, будут малы, так что изготовление обмоток упрощается.

Магнитопроводы трансформаторов собирают встык или внахлест. При сборке встык все части магнитопровода собирают раздельно из отдельных полос или пластин и затем вместе.

При такой сборке просто осуществляется монтаж и демонтаж трансформатора, но в месте стыка необходимо поместить изоляционную прокладку, увеличивающую магнитное сопротивление. При установке ярма его пластины не будут точно совпадать с пластинами стержня, в результате чего пластины ярма и стержня окажутся замкнутыми. Такое замыкание пластин поведет к увеличению вихревых токов, которые могут вызвать недопустимо высокий нагрев стали в месте стыка. Нагрев может стать настолько большим, что стальные пластины сплавятся в сплошную массу («пожар» в стали) и трансформатор выйдет из строя.

При сборке внахлест стальные пластины укладывают так, чтобы у лежащих рядом полос разрезы были в различных точках.

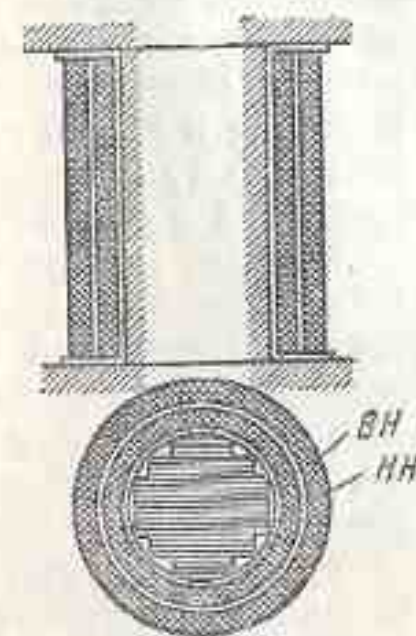


Рис. 100. Расположение обмоток мощного трансформатора на сердечнике

Такая сборка усложняет монтаж и демонтаж трансформатора, но и позволяет значительно уменьшить магнитное сопротивление, так как пластины могут плотно прилегать одна к другой.

В паспорте трансформатора указывают его номинальную мощность P , номинальные напряжения U_1 и U_2 и токи I_1 и I_2 первичной и вторичной обмоток при полной (номинальной) нагрузке.

Номинальной мощностью трансформаторов называется полная мощность, отдаваемая его вторичной обмоткой при полной (номинальной) нагрузке. Номинальная мощность выражается в единицах полной мощности, т. е. в вольтамперах или киловольтамперах. В ваттах и киловаттах измеряют активную мощность трансформатора, т. е. ту мощность, которая может быть преобразована из электрической в механическую, тепловую, химическую, световую и т. д.

Сечения проводов обмоток и всех частей машины или любого электрического аппарата определяются не активной составляющей тока или активной мощностью, а полным током, протекающим по проводнику и, следовательно, полной мощностью.

Трансформаторы малой мощности имеют большую удельную поверхность охлаждения и естественное воздушное охлаждение является для них вполне достаточным.

Трансформаторы большой мощности устраивают с масляным охлаждением, для чего помещают их в металлические баки, наполненные минеральным маслом. Наиболее широко распространено естественное охлаждение стенок бака трансформатора.

Для увеличения охлаждающей поверхности в стенки баков сваривают стальные трубы или радиаторы.

Масло в баке трансформатора в процессе эксплуатации соприкасается с окружающим воздухом и подвергается окислению, увлажнению и загрязнению, вследствие чего уменьшается его электрическая прочность.

Для обеспечения нормальной эксплуатации трансформатора необходимо контролировать температуру масла, заменять его новым, производить периодическую сушку и очистку трансформатора.

Изменение температуры трансформатора приводит к изменению уровня масла. В связи с этим баки трансформаторов снабжаются расширителями.

Расширитель, представляющий собой цилиндрический сосуд из листовой стали, устанавливается над крышкой бака и соединяют патрубком. Уровень масла изменяется только в расширителе, что позволяет уменьшить поверхность масла, соприкасающуюся с воздухом, и предохранить масло от загрязнения и увлажнения.

§ 82. РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ТРАНСФОРМАТОРА

При холостом ходе трансформатора (нагрузки нет) вторичная обмотка его разомкнута и тока в этой обмотке нет. В первичной обмотке при этом протекает ток холостого хода I_0 , который много меньше тока этой обмотки при номинальной нагрузке трансформатора. Ток холостого хода возбуждает переменный магнитный поток,

который замыкается по магнитопроводу и индуцирует в первичной и вторичной обмотках э. д. с., зависящие от числа витков этих обмоток w_1 и w_2 , амплитуды магнитного потока Φ_m (вб) и частоты его изменения f . Действующие значения э. д. с. первичной E_1 и вторичной E_2 обмоток:

$$E_1 = 4,44w_1f\Phi_m \text{ и } E_2 = 4,44w_2f\Phi_m.$$

Если, например, в магнитопроводе трансформатора, включенного в сеть переменного тока с частотой $f = 50$ гц, возбужден магнитный поток с амплитудой $\Phi_m = 0,001$ вб, то при числах витков обмоток $w_1 = 572$ и $w_2 = 108$ действующие значения э. д. с. обмоток равны:

$$E_1 = 4,44w_1f\Phi_m = 4,44 \cdot 572 \cdot 50 \cdot 0,001 = 127 \text{ в}$$

и

$$E_2 = 4,44w_2f\Phi_m = 4,44 \cdot 108 \cdot 50 \cdot 0,001 = 24 \text{ в.}$$

Так как при холостом ходе во вторичной обмотке тока нет, то напряжение на зажимах этой обмотки равно э. д. с., т. е. $U_2 = E_2$. В первичной обмотке протекает небольшой ток холостого хода и напряжение этой обмотки незначительно отличается от э. д. с., т. е. $U_1 \approx E_1$. Отношение напряжений на зажимах первичной и вторичной обмоток трансформатора при холостом ходе (без нагрузки) называется коэффициентом трансформации и обозначается буквой K , т. е.

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44w_1f\Phi_m}{4,44w_2f\Phi_m} = \frac{w_1}{w_2} \quad (100)$$

и

$$U_1 = \frac{w_1}{w_2} U_2 = KU_2; \quad U_2 = \frac{w_2}{w_1} U_1 = \frac{1}{K} U_1. \quad (101)$$

Таким образом, если в трансформаторе первичная и вторичная обмотки имеют различное число витков, то при включении первичной обмотки в сеть переменного тока с напряжением U_1 на зажимах вторичной обмотки возникает напряжение U_2 , не равное напряжению U_1 .

Если, например, первичная обмотка трансформатора с числом витков $w_1 = 880$ включена в сеть с напряжением $U_1 = 220$ в, то напряжение на зажимах вторичной обмотки $w_2 = 48$ определится из следующего соотношения:

$$U_2 = \frac{w_2}{w_1} U_1 = \frac{48}{880} \cdot 220 = 12 \text{ в.}$$

Если вторичную обмотку трансформатора замкнуть на какой-либо приемник электрической энергии (рис. 101), то во вторичной цепи будет протекать ток I_2 , а в первичной обмотке ток I_1 , который может быть представлен геометрической суммой тока холостого хода и нагрузочного тока.

Первичная и вторичная обмотки трансформатора электрически не соединены. Однако надо иметь в виду, что за счет магнитной связи между этими обмотками изменение тока во вторичной обмотке I_2 вызывает соответствующее изменение тока первичной

обмотки I_1 . Если увеличится ток во вторичной обмотке, то увеличится ток и в первичной обмотке. Наоборот, при уменьшении тока во вторичной обмотке, уменьшится ток и в первичной обмотке. Если разомкнуть вторичную обмотку, то ток в ней станет равным нулю, а в первичной обмотке уменьшится до малой величины (ток холостого хода I_0).

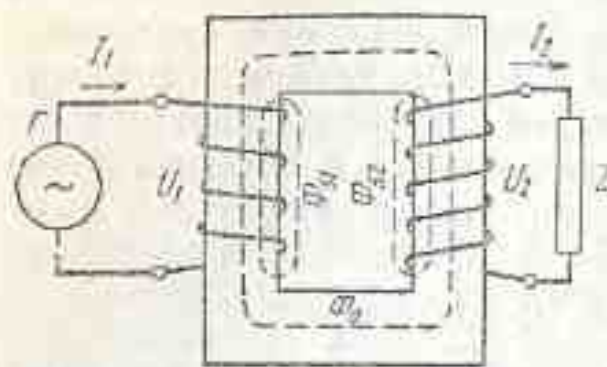


Рис. 101. Схема работы трансформатора

По первичной и вторичной обмоткам при нагрузке протекают численно неравные токи. Если пренебречь потерями мощности в трансформаторе, то мощность, отдаваемая трансформатором приемнику энергии $U_2 I_2$, равна мощности, потребляемой из сети источника энергии $U_1 I_1$, т. е.

$$U_2 I_2 = U_1 I_1,$$

откуда

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = K$$

и

$$I_2 = K I_1. \quad (102)$$

Пренебрегая падением напряжения в сопротивлениях первичной обмотки трансформатора, можно допустить, как это было показано выше, при любой его нагрузке приближенное равенство абсолютных величин приложенного напряжения U_1 и уравновешивающей это напряжение э. д. с. первичной обмотки, т. е.

$$U_1 = E_1. \quad (103)$$

На основании этого равенства можно сказать, что при неизменном по величине приложенном напряжении U_1 будет приблизительно неизменной э. д. с. E_1 , индуцируемая в первичной обмотке трансформатора при любой его нагрузке. А так как э. д. с. E_1 зависит от магнитного потока Φ_m , то и магнитный поток в магнитопроводе трансформатора при любом изменении нагрузки будет приблизительно неизменным.

Таким образом, при неизменном приложенном напряжении амплитуда магнитного потока в сердечнике трансформатора практически неизменна при любом изменении нагрузки.

Ток I_2 , протекающий по вторичной обмотке при нагрузке трансформатора, создает свой магнитный поток, который согласно закону Ленца направлен встречно магнитному потоку в сердечнике, стремясь его уменьшить. Чтобы результирующий магнитный поток в сердечнике остался неизменным, встречный магнитный поток вторичной обмотки должен быть уравновешен магнитным потоком первичной обмотки.

Следовательно, при увеличении тока вторичной обмотки I_2 возрастает размагничивающий магнитный поток этой обмотки и одновременно увеличиваются как ток первичной обмотки I_1 , так и

магнитный поток, создаваемый этим током. Так как магнитный поток первичной обмотки уравновешивает размагничивающий поток вторичной обмотки, то результирующий магнитный поток в сердечнике оказывается неизменным.

В понижающем трансформаторе напряжение первичной обмотки U_1 больше напряжения вторичной обмотки U_2 в K раз, следовательно, и сила тока вторичной обмотки I_2 больше силы тока первичной обмотки I_1 также в K раз. В повышающем трансформаторе имеет место обратное соотношение между напряжениями его обмоток и между силами токов в них.

Если, например, включить на полную нагрузку трансформатор, напряжения первичной и вторичной обмоток которого равны $U_1 = 220$ в, $U_2 = 24$ в, то при номинальной силе тока первичной обмотки $I_1 = 3$ а сила тока во вторичной обмотке

$$I_2 = 3 \cdot \frac{220}{24} = 27,5 \text{ а.}$$

Таким образом, в обмотке с более высоким напряжением сила тока меньше, чем в обмотке с более низким напряжением. Поэтому обмотка с более высоким напряжением имеет большее число витков и наматывается из провода с меньшим поперечным сечением, чем обмотка с более низким напряжением.

При работе трансформатора под нагрузкой в первичной и во вторичной его обмотках протекают токи, создающие потоки рассеяния Φ_{s1} и Φ_{s2} . Эти магнитные потоки сцеплены только с витками той обмотки, током которой они создаются, и всегда меньше основного магнитного потока Φ_0 , замыкающегося по магнитопроводу трансформатора (по стали), так как потоки рассеяния проходят в немагнитной среде. Потоки рассеяния индуцируют в обмотках э. д. с. рассеяния, которые в небольшой степени изменяют напряжение вторичной обмотки трансформатора при изменении его нагрузки.

Чтобы не устанавливать отдельный трансформатор на каждое рабочее напряжение, целесообразно на одном трансформаторе выполнить несколько вторичных обмоток с различным числом витков. Такие трансформаторы, называемые *многообмоточными*, широко применяют в радиоприемниках, телевизорах, усилителях и другой аппаратуре, требующей для питания несколько переменных напряжений различной величины. Соотношения количества витков обмоток определяются их напряжениями, т. е.

$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{U_2}{U_1}, \quad \frac{\omega_3}{\omega_1} = \frac{U_3}{U_1}, \quad \frac{\omega_4}{\omega_1} = \frac{U_4}{U_1}$$

и т. д.

Ток в первичной обмотке равен суммарному току всех вторичных обмоток:

$$I_1 = I_2 \frac{U_2}{U_1} + I_3 \frac{U_3}{U_1} + I_4 \frac{U_4}{U_1} + \dots$$

Изменение тока в любой вторичной обмотке вызывает соответствующее изменение тока первичной обмотки. При этом происходит некоторое изменение напряжения всех вторичных обмоток трансформатора, т. е. напряжение любой вторичной обмотки зависит от тока как в этой обмотке, так и в любой другой вторичной обмотке трансформатора.

§ 83. ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трехфазные трансформаторы изготовляют главным образом стержневыми.

Схема построения магнитопровода трехфазного стержневого трансформатора показана на рис. 102, а. Три одинаковых однофазных трансформатора выполнены так, что их первичные и вторичные обмотки размещены на одном стержне сердечника, а дру-

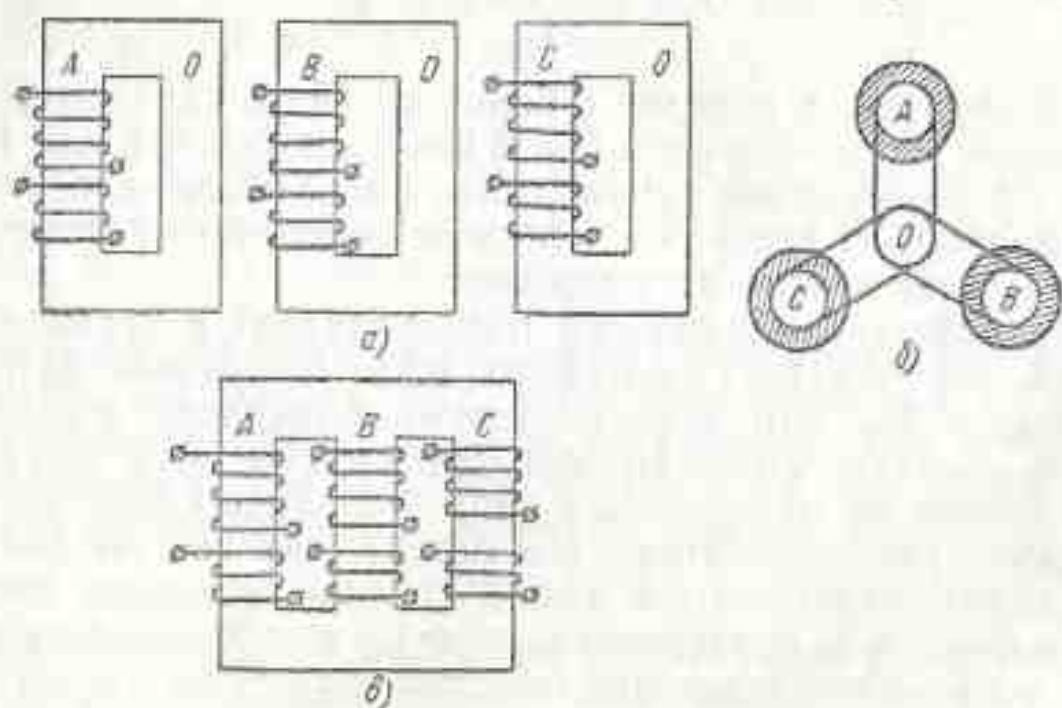


Рис. 102. Схема построения трехфазного трансформатора: а — три однофазных трансформатора, б — три однофазных трансформатора объединены в один магнитопровод, в — схема трехфазного стержневого трансформатора

гой стержень магнитопровода каждого трансформатора не имеет обмотки. Если эти три трансформатора расположились так, чтобы стержни, не имеющие обмоток, находились рядом, то эти три стержня можно объединить в один O (рис. 102, б). Через объединенный стержень O будут замыкаться магнитные потоки трех однофазных трансформаторов, которые равны по величине и сдвинуты по фазе на одну треть периода. Так как сумма трех равных по амплитуде и сдвинутых по фазе на $1/3$ периода магнитных потоков равна нулю в любой момент времени ($\Phi_a + \Phi_b + \Phi_c = 0$), то в объединенном стержне магнитного потока нет и надобность в этом стержне отпадает. Таким образом, для магнитопровода достаточно иметь три стержня, которые по конструктивным соображениям располагаются в одной плоскости (рис. 102, в). На каждом стержне

трехфазного трансформатора размещаются обмотки высшего и низшего напряжения одной фазы. Стержни соединяются между собой ярмом сверху и снизу. Легко видеть, что длина магнитных линий потока среднего стержня меньше, чем крайних стержней, так как магнитный поток среднего стержня встречает на своем пути меньшее магнитное сопротивление, чем магнитные потоки крайних стержней. Поэтому в фазе, обмотка которой помещена на среднем стержне, протекает меньший намагничивающий ток, чем в фазах, обмотки которых помещены на крайних стержнях.

Конструктивно обмотки трехфазных трансформаторов выполняются так же, как и однофазных.

Начала фаз обмоток высшего напряжения обозначаются заглавными буквами A, B и C ; концы фаз обмоток высшего напряжения — X, Y и Z .

Если обмотка высшего напряжения имеет выведенную нулевую точку, то этот зажим обозначается заглавной буквой O .

Зажимы обмоток низшего напряжения обозначаются строчными буквами: a, b, c — начала фаз и x, y, z — концы фаз; o — вывод нулевой точки.

Обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены звездой и треугольником.

При соединении обмоток звездой концы (или начала) всех трех фаз соединяются между собой, образуя нейтральную или нулевую точку, а свободные зажимы начал (или концов) трех фаз подключаются к трем проводам сети источника (или приемника) электрической энергии переменного тока.

При соединении обмоток в треугольник начало первой фазы соединяется с концом второй, начало второй фазы — с концом третьей, начало третьей фазы — с концом первой. Точки соединения начала одной фазы с концом другой подключаются к проводам трехфазной сети переменного тока.

Соединение обмоток трехфазных трансформаторов звездой обозначается Y , а треугольником — Δ . Если обмотки соединены звездой и имеют выведенную нулевую точку, то такое соединение

обозначается Y

Группы трехфазных трансформаторов обозначаются знаками следующего вида:

$$Y/Y-0, Y/\Delta-11 \text{ и т. д.}$$

где знак над чертой показывает схему соединения обмоток высшего напряжения, знак под чертой — схему соединения обмоток низшего напряжения, цифра — угол между векторами линейных э. д. с. обмоток высшего и низшего напряжения, выраженный числом угловых единиц по 30° .

Так, первое обозначение группы показывает, что обмотки высшего и низшего напряжения соединены в звезду, причем обмотки

низшего напряжения имеют выведенную нулевую точку, и угол между векторами линейных э.д.с. обмоток высшего и низшего напряжения равен $12 \times 30^\circ = 360^\circ$, или 0° .

Группы трехфазных трансформаторов зависят от схем соединения обмоток, обозначения зажимов фаз обмоток высшего и низшего напряжения и от направления намоток. Если направление намоток витков обмоток высшего и низшего напряжения одинаково, то э.д.с., индуцируемые в фазах обмоток высшего и низшего напряжения, совпадают по фазе; если же обмотки имеют встречное направление намотки, то э.д.с. фаз высшего и низшего напряжения находятся в противофазе.

В СССР стандартными группами являются следующие:

$$Y/Y-0; Y/\Delta-11 \text{ и } Y/\Delta-11.$$

В стандартных схемах обмотки высшего напряжения соединены звездой, так как при такой схеме фазное напряжение в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного, благодаря чему упрощается изоляция обмоток. Обмотки низшего напряжения чаще соединяются треугольником, так как при таком соединении трансформатор менее чувствителен к несимметрии нагрузки фаз.

Обмотки низшего напряжения соединяются также по схеме звезда с нулем, так как при такой схеме можно в четырехпроводной сети получить два различных напряжения — линейное и фазное (например, 127 и 220 в, 220 и 380 в и т. д.).

§ 84. ОПЫТ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Для испытания трансформатора служит опыт холостого хода и опыт короткого замыкания.

При опыте холостого хода трансформатора (рис. 103) его вторичная обмотка разомкнута и тока в этой обмотке нет ($I_2=0$).

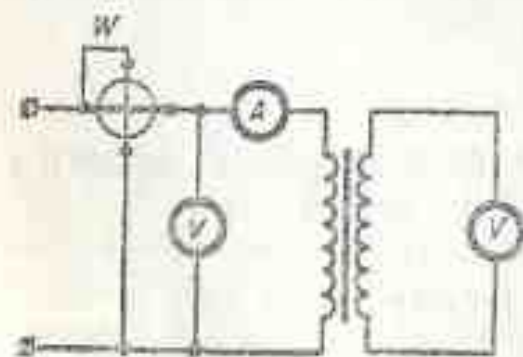


Рис. 103. Схема опыта холостого хода трансформатора

Если первичную обмотку трансформатора включить в сеть источника электрической энергии переменного тока, то в этой обмотке будет протекать ток холостого хода I_0 , который представляет собой малую величину по сравнению с номинальным током трансформатора. В трансформаторах больших мощностей ток холостого хода может достигать значений порядка 5—10% номинального тока. В трансформаторах малых мощностей этот ток достигает значения 25—30% номинального тока.

Ток холостого хода I_0 создает магнитный поток в магнитопроводе трансформатора. Для возбуждения магнитного потока трансформатор потребляет реактивную мощность из сети. Что же касается активной мощности, потребляемой

трансформатором при холостом ходе, то она расходуется на покрытие потерь мощности в магнитопроводе, обусловленных гистерезисом и вихревыми токами.

Так как реактивная мощность при холостом ходе трансформатора значительно больше активной мощности, то коэффициент мощности $\cos\phi$ его весьма мал и обычно равен 0,2—0,3.

По данным опыта холостого хода трансформатора определяется сила тока холостого хода I_0 , потери в стали сердечника $P_{ст}$ и коэффициент трансформации K .

Силу тока холостого хода I_0 измеряет амперметр, включенный в цепь первичной обмотки трансформатора.

При испытании трехфазного трансформатора определяется фазный ток холостого хода.

О потерях в стали сердечника $P_{ст}$ судят по показаниям ваттметра, включенного в цепь первичной обмотки трансформатора.

Коэффициент трансформации трансформатора равен отношению показаний вольтметров, включенных в цепь первичной и вторичной обмоток.

При коротком замыкании вторичной обмотки сопротивление трансформатора очень мало и ток короткого замыкания во много раз больше номинального. Такой большой ток вызывает сильный нагрев обмоток трансформатора и приводит к выходу его из строя. Поэтому трансформаторы снабжаются защитой, отключающей его при коротких замыканиях.

При опыте короткого замыкания (рис. 104) вторичная обмотка трансформатора замкнута накоротко, т. е. напряжение на зажимах вторичной обмотки равно нулю. Первичная обмотка включается в сеть с таким пониженным напряжением, при котором токи в обмотках равны номинальным. Такое пониженное напряжение называется напряжением короткого замыкания и обычно равно 5,5% от номинального значения.

По данным опыта короткого замыкания определяется напряжение короткого замыкания $u_k\%$, его активная $u_a\%$ и реактивная $u_x\%$ составляющие, потери на нагревание обмоток трансформатора $P_{обм}$ при номинальной нагрузке и активное, реактивное и полное сопротивления трансформатора при коротком замыкании r_k , x_k и z_k .

Потери в обмотках указываются ваттметром.

Активное, реактивное и полное сопротивления короткого замыкания трансформатора определяются следующими выражениями:

$$Z_k = \frac{U_k}{I}; \quad r_k = \frac{P_k}{I^2}; \quad x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2},$$

где U_k , I и P_k — напряжение, сила тока, мощность, указываемые

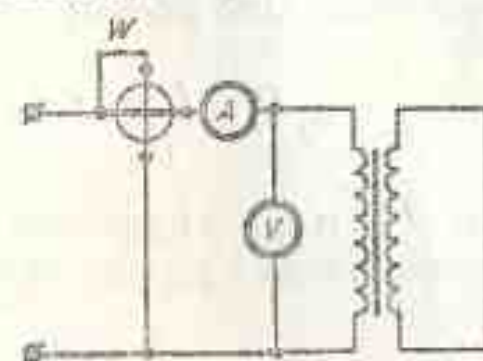


Рис. 104. Схема опыта короткого замыкания трансформатора

измерительными приборами, включенными в цепь первичной обмотки трансформатора.

При испытании трехфазного трансформатора следует в приведенных выше выражениях подставить фазные значения напряжения, тока и мощности.

Напряжение короткого замыкания и его активная и реактивная составляющие равны:

$$u_k \% = \frac{I_n Z_{кк}}{U_n} \cdot 100; \quad u_a \% = \frac{I_n r_k}{U_n} \cdot 100; \quad u_x \% = \frac{I_n x_k}{U_n} \cdot 100,$$

где U_n и I_n — номинальные напряжения и сила тока вторичной (первичной) обмотки трансформатора.

§ 85. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОЧИХ СВОЙСТВ ТРАНСФОРМАТОРОВ ПО ДАННЫМ ОПЫТОВ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Свойства трансформатора при работе его под нагрузкой могут быть определены непосредственным его испытанием. Если включить трансформатор на какую-либо нагрузку и изменить ее, то по показаниям приборов можно определить, каким образом будет изменяться напряжение на зажимах вторичной обмотки и к.п.д. трансформатора. Однако при испытании трансформатора под нагрузкой происходит очень большой расход электроэнергии (тем больший, чем больше мощность трансформатора), и для создания активной, индуктивной и емкостной нагрузок необходимо очень громоздкое оборудование (реостаты, индуктивные катушки и конденсаторы). Кроме этого, непосредственное испытание трансформатора дает очень неточные результаты.

Все рабочие свойства трансформатора могут быть определены по данным опытов холостого хода и короткого замыкания. При этом требуется сравнительно малая затрата энергии и отпадает надобность в громоздком нагрузочном оборудовании, кроме того, такое определение рабочих свойств дает высокую точность.

При опыте холостого хода измеряют напряжение первичной и вторичной обмотки U_1 и U_2 , ток холостого хода I_0 и потребляемую при холостом ходе мощность P_0 , которая расходуется на покрытие потерь в стали магнитопровода, т. е. $P_{ст} = P_0$.

При опыте короткого замыкания измеряют напряжение короткого замыкания U_k , силу тока первичной обмотки, равную номинальной I_n , и мощность P_k , потребляемую трансформатором при опыте короткого замыкания и расходуемую на покрытие потерь в обмотках при номинальной нагрузке, т. е. $P_{обм} = P_k$.

По данным опыта короткого замыкания определяются сопротивление (полное, активное и реактивное) трансформатора при коротком замыкании Z_k , r_k и x_k , а также напряжение короткого замыкания u_k и активная u_a и реактивная u_x составляющие напряжения короткого замыкания.

При испытании трехфазного трансформатора все величины определяются для одной фазы.

По данным опытов холостого хода и короткого замыкания можно найти напряжение на зажимах вторичной обмотки и к.п.д. трансформатора при любой нагрузке.

Процентное понижение вторичного напряжения при любой нагрузке равно:

$$\Delta u \% = \beta (u_a \cos \varphi_2 + u_x \sin \varphi_2),$$

где $\beta = \frac{I}{I_n}$,

I — сила тока при выбранной нагрузке.

Напряжение вторичной обмотки при нагрузке

$$U_2 = U_{20} \left(1 - \frac{\Delta u}{100} \right) \text{ в},$$

где U_{20} — напряжение при холостом ходе.

Таким образом, напряжение вторичной обмотки зависит не только от величины, но и от характера нагрузки.

При индуктивном характере нагрузки напряжение понижается с ростом нагрузки в большей степени, чем при чисто активной. При емкостном характере нагрузки происходит повышение напряжения с ростом нагрузки.

Пример. Напряжение вторичной обмотки трансформатора при холостом ходе $U_{20} = 400$ в. Определить вторичное напряжение при номинальной нагрузке I_n и $\cos \varphi_2 = 1$ (чисто активная нагрузка), $\cos \varphi_2 = 0,8$ (для активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузки), если напряжение короткого замыкания и его активная составляющая равны:

$$u_k \% = 5,5\%; \quad u_a \% = 2,5\%.$$

Решение. Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора

$$u_x = \sqrt{u_k^2 - u_a^2} = \sqrt{5,5^2 - 2,5^2} = 4,9\%.$$

Процентное понижение напряжения

$$\Delta u \% = u_a \cos \varphi_2 + u_x \sin \varphi_2.$$

При активной нагрузке $\Delta u \% = 2,5 \cdot 1 + 0 = 2,5\%$.

При активно-индуктивной нагрузке ($\cos \varphi_2 = 0,8$; $\sin \varphi_2 = 0,6$)

$$\Delta u \% = 2,5 \cdot 0,8 + 4,9 \cdot 0,6 = 2 + 2,94 = 4,94\%.$$

При активно-емкостной нагрузке ($\cos \varphi_2 = 0,8$; $\sin \varphi_2 = 0,6$)

$$\Delta u \% = 2,5 \cdot 0,8 - 4,9 \cdot 0,6 = 2 - 2,94 = -0,94\%.$$

Напряжение вторичной обмотки при активной нагрузке

$$U_2 = U_{20} \left(1 - \frac{\Delta u}{100} \right) = 400 \left(1 - \frac{2,5}{100} \right) = 390 \text{ в},$$

при активно-индуктивной нагрузке

$$U_2 = 400 \left(1 - \frac{4,95}{100} \right) = 380 \text{ в}$$

и при активно-емкостной нагрузке

$$U = 400 \left(1 + \frac{0,96}{100} \right) = 404 \text{ в}.$$

Коэффициентом полезного действия (к. п. д.) или отдачей трансформатора называется отношение полезной мощности трансформатора P_2 к мощности, потребляемой им из сети источника электрической энергии P_1 , т. е.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (104)$$

Потребляемая мощность P_1 будет всегда больше полезной мощности P_2 , так как при работе трансформатора происходит потеря преобразуемой им энергии. Потери в трансформаторе складываются из потерь в стали магнитопровода $P_{ст}$ и потерь в обмотках $P_{об}$.

Таким образом, потребляемую трансформатором мощность можно определить следующим выражением:

$$P_1 = P_2 + P_{ст} + P_{об} \quad (105)$$

Полезную мощность трансформатора находят следующим образом:

для однофазного

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad (106)$$

для трехфазного

$$P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad (107)$$

Следовательно, к. п. д. можно определить следующим выражением:

для однофазного трансформатора

$$\eta = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1 + P_{ст} + P_{об}} \quad (108)$$

для трехфазного трансформатора

$$\eta = \frac{\sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2}{\sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1 + P_{ст} + P_{об}} \quad (109)$$

Наибольший к. п. д. трансформатора будет при нагрузке, для которой потери в стали равны потерям в обмотке. У современных трансформаторов к. п. д. очень высок и достигает при полной нагрузке 95—99,5%.

На практике к. п. д. трансформатора определяется по приведенной выше формуле для любой нагрузки P_2 .

Задаются полезной мощностью P_2 , например 0, 25, 50, 75, 100, 125% номинальной мощности, и для каждой из выбранных мощностей определяют потери в трансформаторе.

Потери в стали магнитопровода $P_{ст}$ зависят от марки стали, из которой выполнен сердечник, от частоты тока сети и магнитной индукции в сердечнике. Так как частота тока сети и магнитная индукция остаются неизменными при работе трансформатора, то и потери в стали не зависят от нагрузки и остаются постоянными.

Потери в обмотках расходуются на нагревание проводников этих обмоток протекающими по ним токами и пропорциональны току

во второй степени. Таким образом, при нагрузке 0,5 от номинальной токи в обмотках будут вдвое, а потери в обмотках в четыре раза меньшими, чем при номинальной нагрузке.

Пример. Трансформатор мощностью $P_2 = 50$ кВА имеет потери в стали $P_{ст} = 350$ Вт и потери в обмотках при полной нагрузке (100%) $P_{об} = 1325$ Вт. Определить коэффициент полезного действия при нагрузках 100%, 75%, 50% и 25% номинальной, считая нагрузку чисто активной ($\cos \varphi = 1$).

Решение: При полной нагрузке полезная мощность трансформатора

$$P_2 = P_{2N} \cos \varphi = 50 \cdot 1 = 50 \text{ кВт} = 50\,000 \text{ Вт},$$

к. п. д. при полной нагрузке

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_{ст} + P_{об}} = \frac{50\,000}{50\,000 + 350 + 1325} = 0,9675.$$

При нагрузке 0,75 P_2 полезная мощность $P_2 = 0,75 \cdot 50\,000 = 37\,500$ Вт, потери в обмотках $P_{об} = (0,75)^2 \cdot P_{обN} = (0,75)^2 \cdot 1325 = 694$ Вт и к. п. д.

$$\eta = \frac{37\,500}{37\,500 + 350 + 694} = 0,973.$$

При нагрузке 0,5 P_2 полезная мощность $P_2 = 0,5 \cdot 50\,000 = 25\,000$ Вт, потери в обмотках $P_{об} = 0,5^2 \cdot 1325 = 331$ Вт и к. п. д.

$$\eta = \frac{25\,000}{25\,000 + 350 + 331} = 0,973.$$

При нагрузке 0,25 P_2 полезная мощность $P_2 = 0,25 \cdot 50\,000 = 12\,500$ Вт, потери в обмотках $P_{об} = (0,25)^2 \cdot 1325 = 83$ Вт и к. п. д.

$$\eta = \frac{12\,500}{12\,500 + 350 + 83} = 0,966.$$

§ 86. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

В конструктивном отношении автотрансформатор подобен трансформатору: на стальном магнитопроводе помещаются две обмотки, выполненные из проводников различного поперечного сечения. Конец одной обмотки электрически соединяется с началом другой так, что две последовательно соединенные обмотки образуют общую обмотку высшего напряжения. Обмоткой низшего напряжения, являющейся частью обмотки высшего напряжения, служит одна из двух обмоток автотрансформатора. Таким образом, между обмотками высшего и низшего напряжения автотрансформатора имеется не только магнитная, но и электрическая связь.

Принципиальная схема понижающего автотрансформатора показана на рис. 105. Первичное напряжение подведено к зажимам А—Х первичной обмотки с числом витков w_1 . Вторичной обмоткой является часть первичной а—х с числом витков w_2 .

При холостом ходе $I_2 = 0$, пренебрегая

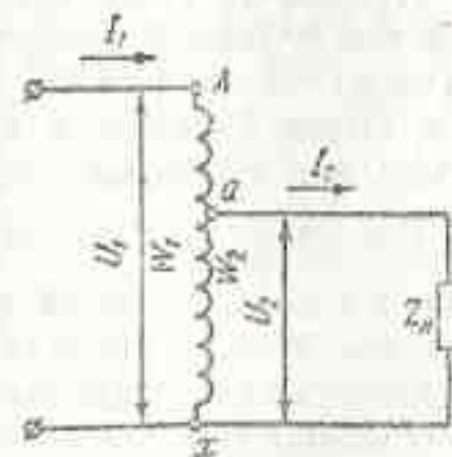


Рис. 105. Схема понижающего автотрансформатора

падением напряжения в сопротивлениях первичной обмотки, можно записать уравнения равновесия э. д. с. для первичной и вторичной обмоток в следующем виде:

$$U_1 = E_1 = 4,44\omega_1 f\Phi \text{ и } U_2 = E_2 = 4,44\omega_2 f\Phi. \quad (110)$$

Отношение напряжения первичной и вторичной обмоток при холостом ходе называется коэффициентом трансформации автотрансформатора, т. е.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = K.$$

Если вторичную обмотку автотрансформатора замкнуть на какой-либо приемник энергии, то во вторичной цепи будет протекать ток I_2 . Пренебрегая потерями энергии, мощность, потребляемую автотрансформатором из сети, можно принять равной мощности, отдаваемой во вторичную сеть, т. е.

$$P = U_1 I_1 = U_2 I_2, \quad (111)$$

откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{1}{K}. \quad (112)$$

Таким образом, основные соотношения трансформатора остаются без изменения в автотрансформаторах.

В общей части обмотки $a-x$, принадлежащей сети высшего и низшего напряжения, протекают токи I_1 и I_2 , направленные встречно.

Если пренебречь током холостого хода, величина которого очень мала, то можно считать, что токи I_1 и I_2 сдвинуты по фазе на 180° , и сила тока I_{12} в части обмотки $a-x$ равна арифметической разности сил токов вторичной и первичной сети, т. е.

$$I_{12} = I_2 - I_1 = I_2 \left(1 - \frac{1}{K}\right).$$

В понижающем автотрансформаторе ток I_{12} совпадает по направлению с током I_2 , в повышающем — направлен противоположно току I_2 .

Преимуществом автотрансформатора перед трансформатором той же полезной мощности является меньший расход активных материалов — обмоточного провода и стали, меньшие потери энергии, более высокий к. п. д., меньшее изменение напряжения при изменении нагрузки.

Вес провода обмоток автотрансформатора примерно в $\frac{K}{K-1}$ раз меньше веса провода обмоток трансформатора при одинаковых плотностях тока. Это объясняется тем, что у трансформатора на сердечнике имеются две обмотки — первичная с числом витков ω_1 , поперечное сечение провода которой рассчитано на силу тока I_1 , и вторичная с числом витков ω_2 , поперечное сечение провода которой рассчитано на силу тока I_2 . У автотрансформатора также две обмотки, но одна из них (часть $A-a$) имеет число витков ($\omega_1 - \omega_2$)

из провода, поперечное сечение которого рассчитано на силу тока I_1 , а другая (часть $a-x$) с числом витков ω_2 из провода, поперечное сечение которого рассчитано на разность сил токов $I_2 - I_1 = I_{12}$.

Поперечное сечение и вес стали магнитопровода автотрансформатора также меньше сечения и веса стали магнитопровода трансформатора. Это объясняется тем, что в трансформаторе энергия из первичной сети во вторичную передается магнитным путем в результате электромагнитной связи между обмотками. В автотрансформаторе энергия из первичной сети во вторичную частично передается путем электрического соединения первичной и вторичной сети, т. е. электрическим путем. Так как в процессе передачи этой энергии магнитный поток не участвует, у автотрансформатора электромагнитная мощность меньше, чем у трансформатора.

Полезная мощность автотрансформатора при активной нагрузке равна: $P_2 = U_2 I_2$.

Имея в виду, что $I_2 = I_1 + I_{12}$, получим:

$$P_2 = U_2 I_1 + U_2 I_{12} = P_{\text{эл}} + P_{\text{м}},$$

где $P_{\text{м}}$ — электромагнитная мощность автотрансформатора, определяющая необходимый магнитный поток, поперечное сечение и вес стали магнитопровода. Эта мощность является расчетной или габаритной мощностью автотрансформатора.

Наряду с преимуществами автотрансформаторов перед трансформаторами они имеют существенные недостатки: малое сопротивление короткого замыкания, что обуславливает большую кратность тока короткого замыкания; возможность попадания высшего напряжения в сеть низшего напряжения из-за электрической связи между этими сетями. Наличие электрической связи между сетью источника и приемника энергии делает невозможным применение автотрансформатора в том случае, когда приемник энергии имеет заземленный полюс (в выпрямительных устройствах).

Достоинства автотрансформаторов будут выражены тем сильнее, чем коэффициент трансформации ближе к единице. Поэтому автотрансформаторы применяют при небольших коэффициентах трансформации ($K = 1-2$).

В трехфазных сетях используют трехфазные автотрансформаторы, обмотки которых обычно соединяются звездой.

§ 87. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Измерительные трансформаторы делятся на трансформаторы напряжения и трансформаторы тока. Их применяют в цепях переменного тока для расширения пределов измерения измерительных приборов и для изоляции этих приборов от токоведущих частей, находящихся под высоким напряжением.

Трансформаторы напряжения (рис. 106, а) конструктивно представляют собой обычные трансформаторы малой мощности. Первичная обмотка такого трансформатора включается в два линей-

ных провода сети, напряжение которой измеряется или контролируется; во вторичную обмотку включают вольтметр или параллельную обмотку ваттметра, счетчика и т. п. Коэффициент трансформации трансформатора напряжения выбирают таким, чтобы при номинальном первичном напряжении напряжение вторичной обмотки было 100 в.

Работа трансформатора напряжения подобна режиму холостого хода обычного силового трансформатора, так как сопротивление вольтметра или параллельной обмотки ваттметра, счетчика и т. п. велико и током во вторичной обмотке можно пренебречь.

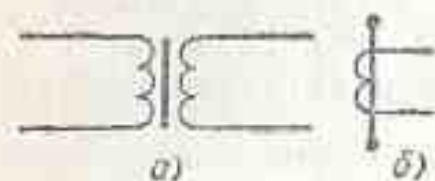


Рис. 106. Схемы измерительного трансформатора: а — напряжения, б — тока

Включение во вторичную обмотку большого числа измерительных приборов нежелательно. Если параллельно вольтметру, включенному во вторичную обмотку трансформатора, подсоединить еще один вольтметр или параллельную обмотку ваттметра, счетчика и т. п., то ток во вторичной обмотке трансформатора увеличится, что вызовет падение напряжения на зажимах вторичной обмотки, и точность показания приборов понизится.

Трансформаторы тока (рис. 106, б) служат для преобразования переменного тока большой силы в ток малой силы и изготавливаются таким образом, чтобы при номинальной силе тока первичной цепи во вторичной обмотке сила тока была 5 а.

Первичная обмотка трансформатора тока включается в разрез линейного провода (последовательно с нагрузкой), сила тока в котором измеряется; вторичная обмотка замкнута на амперметр или на последовательную обмотку ваттметра, счетчика и т. п., т. е. на измерительный прибор с малым сопротивлением.

Режим работы трансформатора тока существенно отличается от режима работы обычного трансформатора. В обычном трансформаторе при изменении нагрузки магнитный поток в сердечнике остается практически неизменным, если постоянно приложенное напряжение.

Если в обычном трансформаторе уменьшить нагрузку, т. е. силу тока во вторичной обмотке, то и в первичной обмотке сила тока уменьшится и, если вторичную обмотку разомкнуть, то сила тока в первичной обмотке уменьшится до тока холостого хода I_0 .

При работе трансформатора тока его вторичная обмотка замкнута на измерительный прибор с малым сопротивлением и режим работы трансформатора близок к короткому замыканию. Поэтому магнитный поток в магнитопроводе трансформатора мал.

Если разомкнуть вторичную обмотку трансформатора тока, то тока в этой обмотке не будет, тогда как в первичной обмотке сила тока остается неизменной.

Таким образом, при разомкнутой вторичной обмотке трансформатора тока магнитный поток в магнитопроводе, возбужденный током первичной обмотки и не встречающий размагничивающего

действия тока вторичной обмотки, окажется очень большим и, следовательно, э. д. с. вторичной обмотки, имеющей большее число витков, достигает большой величины, опасной для целостности изоляции этой обмотки и для обслуживающего персонала. Поэтому при выключении измерительных приборов из вторичной обмотки трансформатора тока эту обмотку необходимо замкнуть накоротко.

Включение большого числа измерительных приборов во вторичную обмотку трансформатора тока снижает точность измерения.

Конструкции трансформаторов тока в зависимости от назначения чрезвычайно разнообразны и делятся на стационарные и переносные.

При работе измерительных трансформаторов напряжения и тока возможен пробой изоляции их первичных обмоток и, как следствие пробоя, электрическое соединение первичной обмотки с сердечником или со вторичной обмоткой.

Для безопасности обслуживания сердечники и вторичные обмотки измерительных трансформаторов заземляются.

Контрольные вопросы

1. Объясните назначение и принцип действия трансформатора.
2. Какую форму имеют магнитопроводы однофазных трансформаторов?
3. Каково устройство магнитопровода и обмоток трансформаторов?
4. Каким выражением определяется действующее значение э. д. с. обмотки трансформатора?
5. Изменится ли ток в первичной обмотке трансформатора, если при изменении нагрузки увеличился ток во вторичной обмотке?
6. Что называется коэффициентом трансформации?
7. Как производят опыты холостого хода и короткого замыкания трансформатора и какие параметры его определяются из этих опытов?
8. При какой нагрузке трансформатор имеет наибольший к. п. д.?
9. Каковы достоинства и недостатки автотрансформаторов по сравнению с трансформаторами?
10. Поясните назначение и схемы включения измерительных трансформаторов.

ГЛАВА VIII АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

§ 88. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Электрические машины широко применяют на электрических станциях, в промышленности, на транспорте, в авиации, в системах автоматического регулирования и управления, в быту.

Электрические машины преобразуют механическую энергию в электрическую и, наоборот, электрическую энергию в механическую. Машина, преобразующая механическую энергию в электрическую, называется *генератором*. Преобразование электрической энергии в механическую осуществляется *двигателями*.

Любая электрическая машина может быть использована как в качестве генератора, так и в качестве двигателя. Это свойство электрической машины изменять направление преобразуемой ею

энергии называется обратимостью машины. Электрическая машина может быть также использована для преобразования электрической энергии одного рода тока (частоты, числа фаз переменного тока, напряжения постоянного тока) в энергию другого рода тока. Такие электрические машины называются *преобразователями*.

В зависимости от рода тока электроустановки, в которой должна работать электрическая машина, они делятся на машины постоянного и машины переменного тока.

Машины переменного тока могут быть как однофазными, так и многофазными. Наиболее широкое применение нашли трехфазные синхронные и асинхронные машины.

Находят также применение коллекторные машины переменного тока, которые допускают экономичное регулирование скорости вращения в широких пределах.

Принцип действия электрических машин основан на использовании законов электромагнитной индукции и электромагнитных сил. Если в магнитном поле полюсов постоянных магнитов или электромагнитов (рис. 107) поместить проводник и под действием

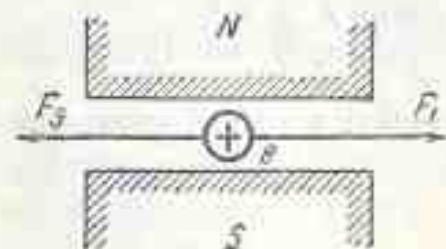


Рис. 107. Принцип действия электрической машины

какой-либо силы F_1 перемещать его, то в нем возникает э. д. с., равная:

$$E = Blv, *$$

где B — магнитная индукция в месте, где находится проводник,
 l — активная длина проводника (та его часть, которая находится в магнитном поле),

v — скорость перемещения проводника в магнитном поле.

Направление э. д. с. (на рисунке от зрителя за плоскость чертежа), индуцируемой в проводнике, определяется согласно правилу правой руки.

Если этот проводник замкнуть на какой-либо приемник энергии, то в замкнутой цепи под действием э. д. с. будет протекать ток, совпадающий по направлению с э. д. с. в проводнике. В результате взаимодействия тока I в проводнике с магнитным полем полюсов создается электромагнитная сила F_2 , направление которой определяется по правилу левой руки; эта сила будет направлена навстречу силе, перемещающей проводник в магнитном поле. При равенстве сил $F_1 = F_2$ проводник будет перемещаться с постоянной скоростью. Следовательно, в такой простейшей электрической машине механическая энергия, затрачиваемая на перемещение проводника, преобразуется в энергию электрическую, отдаваемую сопротивлению внешнего приемника энергии, т. е. машина работает генератором. Та же простейшая электрическая машина может работать двигателем. Если от постороннего источника электрической энергии через проводник пропустить ток, то в результате взаимодействия тока в проводнике с магнитным полем полюсов создается электромагнитная сила F_2 , под действием которой проводник начнет перемещаться в магнитном поле, преодолевая силу торможения какого-либо механического приемника энергии. Таким образом, рассмотренная машина так же, как и любая электрическая машина, обратима, т. е. может работать как генератором, так и двигателем.

Для увеличения э. д. с. и электромеханических сил электрические машины снабжаются обмотками, состоящими из большого числа проводов, которые соединяются между собой так, чтобы э. д. с. в них имели одинаковое направление и складывались.

Э. д. с. в проводнике будет индуцирована также и в том случае, когда проводник неподвижен, а перемещается магнитное поле полюсов.

§ 89. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Наибольшее распространение среди электрических двигателей получил трехфазный асинхронный двигатель, впервые сконструированный известным русским электриком М. О. Доливо-Добровольским.

* Это соотношение предполагает, что проводник перемещается перпендикулярно направлению магнитных линий поля.

Асинхронный двигатель отличается простотой конструкции и несложностью обслуживания. Как и любая машина переменного тока асинхронный двигатель состоит из двух основных частей: статора и ротора. Статором называется неподвижная часть машины, ротором — ее вращающаяся часть. Асинхронная машина обладает свойством обратимости, т. е. может быть использована как в режиме генератора, так и в режиме двигателя. Из-за ряда существенных недостатков асинхронные генераторы практически почти не применяются, тогда как асинхронные двигатели, как это было отмечено выше, получили очень широкое распространение.

Поэтому мы будем рассматривать работу асинхронной машины в режиме двигателя, т. е. процесс преобразования электрической энергии в энергию механическую.

Многофазная обмотка переменного тока создает вращающееся магнитное поле, скорость вращения которого в минуту

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}$$

Если ротор вращается со скоростью n_2 , равной скорости вращения магнитного поля ($n_2 = n_1$), то такая скорость называется *синхронной*.

Если ротор вращается со скоростью, не равной скорости вращения магнитного поля ($n_2 \neq n_1$), то такая скорость называется *асинхронной*.

В асинхронном двигателе рабочий процесс может протекать только при асинхронной скорости, т. е. при скорости вращения ротора, не равной скорости вращения магнитного поля.

Скорость ротора может очень мало отличаться от скорости поля, но при работе двигателя она будет всегда меньше ($n_2 < n_1$).

Работа асинхронного двигателя основана на явлении, названном диск Араго-Ленца (рис. 108). Это явление заключается в следующем: если перед полюсами постоянного магнита поместить медный диск *I*, свободно сидящий на оси *2*, и начать вращать магнит вокруг его оси при помощи рукоятки, то медный диск будет вращаться в том же направлении. Это объясняется тем, что при вращении магнита магнитные линии его поля, замыкаясь от северного полюса к южному, пронизывают диск и индуцируют в нем вихревые токи. В результате взаимодействия вихревых токов с магнитным полем магнита возникает сила, приводящая диск во вращение. На основании закона Ленца направление всякого индуцированного тока таково, что он противодействует причине, его вызвавшей. Поэтому вихревые токи в теле диска стремятся задержать вращение магнита, но, не имея возможности сделать это, приводят диск во вращение так, что он следует за магнитом. При этом скорость вращения диска всегда меньше, чем скорость вращения магнита. Если бы эти скорости почему-либо стали одинаковыми, то магнитные линии не пересекали бы диска и, следовательно, в нем не возникали бы вихревые токи, т. е. не было бы силы, под действием которой диск вращается.

В асинхронных двигателях постоянный магнит заменен вращающимся магнитным полем, создаваемым трехфазной обмоткой статора при включении ее в сеть переменного тока.

Вращающееся магнитное поле статора пересекает проводники обмотки ротора и индуцирует в них э. д. с. Если обмотка ротора замкнута на какое-либо сопротивление или накоротко, то по ней под действием индуцируемой э. д. с. протекает ток. В результате взаимодействия тока в обмотке ротора с вращающимся магнитным полем обмотки статора создается вращающийся момент, под действием которого ротор начинает вращаться.

Например, выделим часть окружности ротора, на которой находится один проводник его обмотки. Поле статора представим северным полюсом *N*, который вращается в пространстве и вокруг ротора по часовой стрелке с числом оборотов n_1 в минуту. Следовательно, полюс *N* перемещается относительно проводника обмотки ротора слева направо, в результате чего в этом проводнике индуцируется э. д. с., которая согласно правилу правой руки направлена на зрителя (знак «точка»). Если обмотка ротора замкнута, то под действием э. д. с. по этой обмотке течет ток, направленный в выбранном нами проводнике также на зрителя.

В результате взаимодействия тока в проводнике обмотки ротора с магнитным полем возникает сила *F*, которая перемещает проводник в направлении, определяемом по правилу левой руки, т. е. слева направо. Вместе с проводником начинает перемещаться и ротор.

Если силу *F*, действующую на проводник обмотки ротора, умножить на расстояние этого проводника от оси ротора (плечо приложения силы), то получим вращающийся момент, развиваемый током данного проводника. Так как на роторе помещено большое количество проводников, то сумма произведений сил, действующих на каждый из проводников, на расстояния этих проводников от оси ротора определяет вращающийся момент, развиваемый двигателем. Под действием вращающегося момента ротор приходит во вращение по направлению вращения магнитного поля. Следовательно, для реверсирования двигателя, т. е. для изменения направления вращения ротора, необходимо изменить направление вращения магнитного поля, созданного обмоткой статора. Это достигается изменением чередования фаз обмоток статора; для чего следует поменять местами по отношению к зажимам сети любые два из трех проводов, соединяющих обмотку статора с сетью. Реверсивные двигатели снабжаются переключателями, при помощи которых можно изменять чередование фаз обмоток статора, а следовательно, и направление вращения ротора.

Вне зависимости от направления вращения ротора его скорость

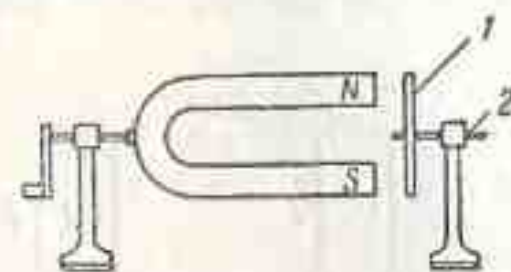


Рис. 108. Принцип действия асинхронного двигателя

n_2 , как уже указывалось, всегда меньше скорости магнитного поля статора.

Если предположить, что в какой-то момент времени число оборотов ротора оказалось равным числу оборотов поля статора, то проводники обмотки ротора не будут пересекаться магнитными

линиями поля статора и тока в роторе не будет. В этом случае вращающий момент станет равным нулю, и скорость вращения ротора уменьшится по сравнению со скоростью вращения поля статора, пока не возникнет вращающий момент, уравновешивающий тормозной момент, который складывается из момента нагрузки на валу и момента сил трения в машине.

§ 90. ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Обмотка машины является очень существенной частью, так как в ней создается э. д. с. и происходит процесс преобразования энергии.

В зависимости от назначения, мощности и условий работы машины обмотки имеют различное конструктивное устройство. В машинах переменного тока используются следующие основные типы обмоток: 1) катушечные, 2) стержневые, 3) специальные.

Катушечные обмотки изготавливают из изолированного медного или алюминиевого провода круглого поперечного сечения, стержневые и специальные — из шин прямоугольного поперечного сечения. Специальные обмотки применяют для короткозамкнутых обмоток роторов асинхронных двигателей, для пусковых и успокоительных обмоток синхронных машин, для одноякорных преобразователей и т. д.

Конструктивно обмотки могут быть выполнены в зависимости от расположения их в пазах однослойными и двухслойными, в зависимости от их изготовления — ручными и

шаблонными, в зависимости от числа пазов на полюс и фазу q — с целым и с дробным числом.

В машинах переменного тока преимущественно применяют двухслойные обмотки. В машинах малой мощности используют однослойную обмотку, изготовление которой встречает затруднения. При однослойном расположении активных проводников в пазах лобовые соединения, находящиеся на торцовых сторонах статора или ротора, окажутся лежащими в одной плоскости, что делает невозможным выполнение шаблонной обмотки. На рис. 109, а изображены две катушки одной фазы однослойной обмотки. Катушки состоят из активных проводников, отстоящих один от другого на расстоянии шага обмотки y , примерно равного полюсному делению, т. е. расстоянию между центрами разноименных полюсов. Лобовые соединения между проводами 1 и $1+y$, 2 и $2+y$ и т. д. находятся в одной плоскости, и, следовательно, при намотке эти лобовые соединения необходимо выгибать в различных направлениях.

В однослойной обмотке лобовые соединения могут находиться в различных плоскостях, если изменен порядок соединения активных проводников, как это показано на рис. 109, б. Однако при такой обмотке катушки имеют различную величину, а, следовательно, требуется несколько шаблонов для изготовления такой обмотки.

В двухслойных обмотках (рис. 109, в) активный проводник, расположенный в верхнем слое паза, соединяется с проводником, расположенным в нижнем слое паза, который отстоит от начального на расстоянии y . При такой обмотке лобовые соединения не пересекаются и находятся в различных плоскостях, что дает возможность выполнить шаблонную обмотку при одинаковых размерах и форме катушек.

Обмотки могут быть однофазными и многофазными. Наиболее широкое применение нашли трехфазные обмотки. Мощность трехфазной машины в 1,5 раза больше мощности однофазной при одинаковых габаритах и потери энергии. На рис. 110 изображена простейшая трехфазная обмотка и ее развернутая схема. Эта обмотка состоит из трех одинаковых катушек, оси которых сдвинуты в пространстве на 120° . При вращении магнита с полюсами N и S в этих катушках будут индуцированы э. д. с., равные по величине и сдвинутые по фазе на $1/3$ периода.

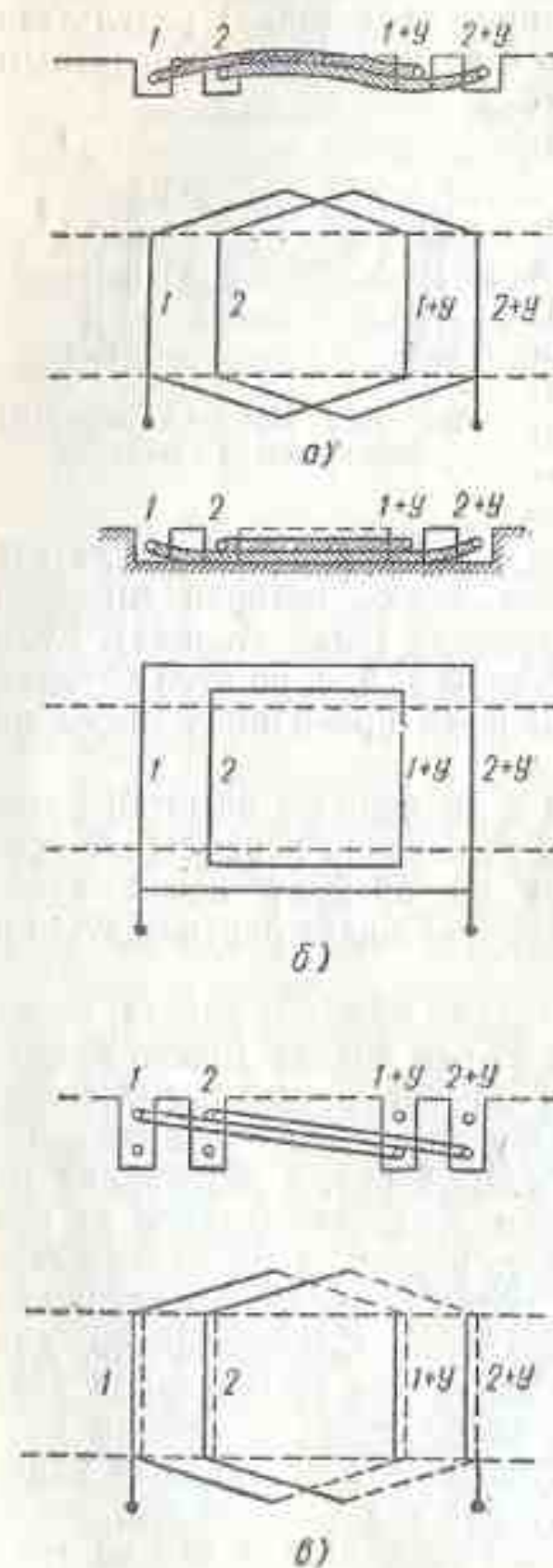


Рис. 109. Катушки обмоток машин переменного тока: а — однослойной с пересекающимися лобовыми соединениями, б — однослойной разнокатушечной, в — двухслойной

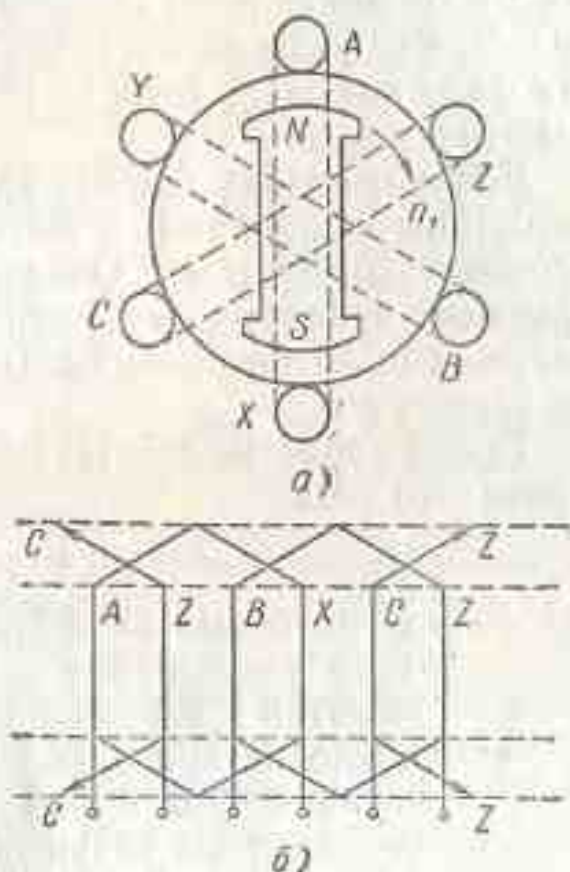


Рис. 110. Схема простейшей трехфазной обмотки: а — радиальная, б — развернутая

Обмотки, в которых фаза состоит из одной катушки, не находят применения. На практике получили распространение распределенные обмотки, в которых витки, принадлежащие одной фазе, равномерно расположены между несколькими парами пазов. При такой обмотке форма кривой магнитной индукции в пространстве ближе к синусоиде.

Однако в распределенных обмотках происходит некоторое уменьшение э. д. с. Это объясняется тем, что оси катушек, последовательно включенных в одну фазу, не совпадают, а следовательно, не совпадают по фазе э. д. с., индуцированные в этих катушках. Э. д. с. фазы равна геометрической сумме э. д. с. составляющих эту фазу катушек, которая окажется меньше арифметической суммы этих э. д. с.

Для улучшения формы кривой э. д. с. обмотки машин переменного тока выполняют с шагом, меньшим полюсного деления (с укороченным шагом). Однако укорочение шага обмотки также приводит к некоторому уменьшению э. д. с., так как в том случае катушки обмотки пронизываются не всем потоком полюса, а только частью его.

Таким образом, действующее значение э. д. с. фазы машины переменного тока

$$E = 4,44 K_0 \omega f \Phi_m$$

где K_0 — обмоточный коэффициент (меньше единицы), учитывающий уменьшение э. д. с. машины за счет распределения обмотки и укорочения шага ее,

ω — число витков одной фазы обмотки, равное произведению числа витков одной катушки на число последовательно соединенных катушек.

§ 91. УСТРОЙСТВО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Схема устройства асинхронного двигателя показана на рис. 111.

Сердечник статора набирается из стальных пластин толщиной 0,35 или 0,5 мм. Пластин штампуют со впадинами (пазами), изолируют лаком, окалиной или тонкой бумагой для уменьшения потерь на вихревые токи, собирают в отдельные пакеты и крепят в станине двигателя. К станине прикрепляют также боковые щиты с помещенными на них подшипниками, на которые опирается вал ротора. Станину устанавливают на фундаменте.

В продольные пазы статора укладывают проводники его обмотки, которые соответствующим образом соединяют между собой, образуя трехфазную систему. На щитке машины имеется шесть зажимов, к которым присоединяются начала и концы обмоток каждой фазы. Для подключения обмоток статора к трехфазной сети они могут быть соединены звездой или треугольником, что дает возможность включать двигатель в сеть с двумя различными линейными напряжениями. Например, двигатель может работать от

сети с напряжением 220 и 127 в или 380 и 220 в. На щитке машины указаны оба напряжения сети, на которые рассчитан двигатель, т. е. 220/127 в или 380/220 в.

Для более низких напряжений, указанных на щитке, обмотки статора соединяются в треугольник, для более высоких — в звезду.

Для соединения обмоток статора треугольником на щитке машины верхние зажимы соединяют перемычками с нижними (рис. 112), а каждую пару соединенных вместе зажимов подключают к линейным проводам трехфазной сети. Для соединения звездой три нижних зажима на щитке соединяют перемычками в общую точку, а верхние подключают к линейным проводам трехфазной сети.

Сердечник ротора также набирают из стальных пластин толщиной 0,5 мм, изолированных лаком или тонкой бумагой для уменьшения потерь на вихревые токи. Пластин штампуют с впадинами и собирают в пакеты, которые крепят на валу машины, образуя цилиндр с продольными пазами. В пазах укладывают проводники обмотки ротора. В зависимости от типа обмотки асинхронные машины могут быть с фазным и короткозамкнутым роторами. Фазная обмотка ротора выполнена подобно статорной, т. е. проводники соответствующим образом соединены между собой, образуя трехфазную систему. Обмотки трех фаз соединены звездой. Начала этих обмоток подключены к трем контактными медным кольцам, укрепленным на валу ротора. Кольца изолированы друг от друга и от вала и вращаются вместе с ротором. При вращении колец поверхности их скользят по угольным или медным щеткам, неподвижно укрепленным над кольцами. Обмотка ротора может быть замкнута на какое-либо сопротивление или накоротко при помощи указанных выше щеток. Короткозамкнутая обмотка ротора выполняется по типу беличьего колеса (рис. 113). В пазах

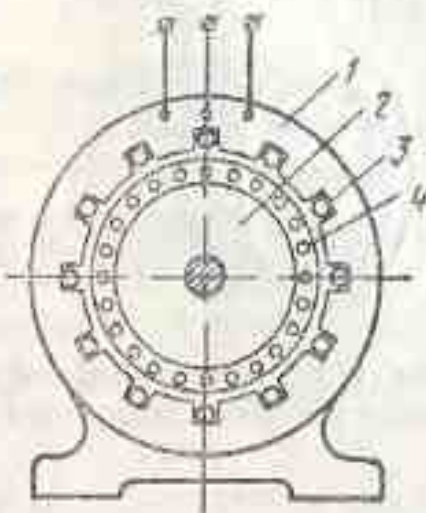


Рис. 111. Схема устройства асинхронного двигателя:
1 — статор, 2 — ротор, 3 — обмотка статора, 4 — обмотка ротора

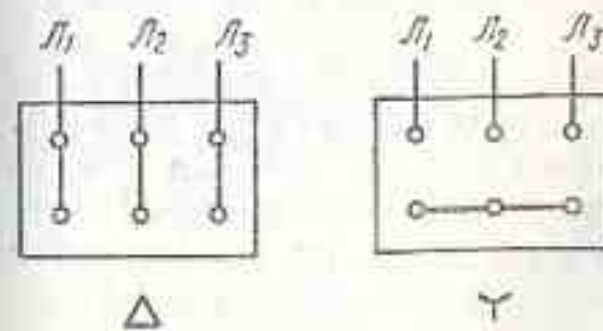


Рис. 112. Соединение зажимов на щитке двигателя при включении обмоток статора треугольником и звездой

ротора укладывают массивные стержни, соединенные на торцовых сторонах медными кольцами. Часто короткозамкнутую обмотку ротора изготавливают из алюминия. Алюминий в горячем состоянии заливают в пазы ротора под давлением. Такая обмотка всегда замкнута накоротко и включение сопротивлений в нее невозможно.

Двигатели с короткозамкнутым ротором проще и надежнее

в эксплуатации, значительно дешевле, чем двигатели с фазным ротором. Однако двигатели с фазным ротором, как мы увидим ниже, обладают лучшими пусковыми и регулировочными свойствами.

В настоящее время асинхронные двигатели выполняют преимущественно с короткозамкнутым ротором и лишь при больших мощностях и в специальных случаях используют фазную обмотку ротора.

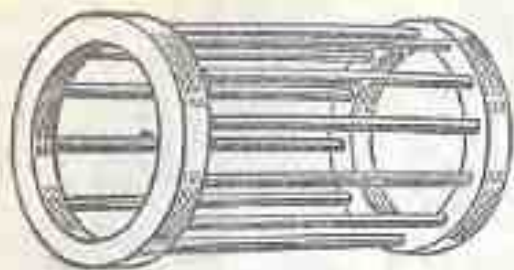


Рис. 113. Короткозамкнутая обмотка ротора асинхронного двигателя

В СССР производят асинхронные двигатели мощностью от нескольких десятков ватт до 15 000 кВт при напряжениях обмотки статора до 6 кВ.

Между статором и ротором имеется воздушный зазор, величина которого оказывает существенное влияние на рабочие свойства двигателя.

Наряду с важными положительными качествами — простотой конструкции и обслуживания, малой стоимо-

стью — асинхронный двигатель имеет и некоторые недостатки, из которых наиболее существенным является относительно низкий коэффициент мощности ($\cos \varphi$). У асинхронного двигателя $\cos \varphi$ при полной нагрузке может достигать значений 0,85—0,9; при недогрузках двигателя его $\cos \varphi$ резко уменьшается и при холостом ходе составляет 0,2—0,3.

Низкий коэффициент мощности асинхронного двигателя объясняется большим потреблением реактивной мощности, которая необходима для возбуждения магнитного поля. Магнитный поток в асинхронном двигателе встречает на своем пути воздушный зазор между статором и ротором, который в большой степени увеличивает магнитное сопротивление, а следовательно, и потребляемую двигателем реактивную мощность.

В целях повышения коэффициента мощности асинхронных двигателей воздушный зазор стремятся делать возможно меньшим, доводя его у малых двигателей (порядка 2—5 кВт) до 0,3 мм. В двигателях большой мощности воздушный зазор приходится увеличивать по конструктивным соображениям, но все же он не превышает 2—2,5 мм.

§ 92. РАБОТА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОД НАГРУЗКОЙ

В рабочем режиме ротор двигателя вращается с числом оборотов в минуту n_2 , меньшим числа оборотов n_1 магнитного поля статора, вращающегося в том же направлении, что и ротор. Поэтому магнитное поле, имеющее большую скорость, скользит относительно ротора с числом оборотов, равным разности чисел оборотов поля и ротора, т. е.

$$n_s = n_1 - n_2 \text{ [об/мин]}, \quad (113)$$

Относительное отставание ротора от вращающегося магнитного поля статора характеризуется скольжением S .

Скольжение представляет собой отношение числа оборотов магнитного поля статора относительно вращающегося ротора к числу оборотов поля статора в пространстве, т. е.

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (114)$$

Эта формула определяет скольжение в относительных единицах. Скольжение может быть также выражено в процентах:

$$S\% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100. \quad (115)$$

Если ротор неподвижен ($n_2 = 0$), то скольжение равно единице или 100%.

Если ротор вращается синхронно с магнитным полем, т. е. с одинаковой скоростью ($n_2 = n_1$), то скольжение равно нулю.

Таким образом, чем больше скорость вращения ротора, тем меньше скольжение.

В рабочем режиме асинхронного двигателя скольжение мало. У современных асинхронных двигателей скольжение при полной нагрузке составляет 3—5%, т. е. ротор вращается с числом оборотов, незначительно отличающимся от числа оборотов магнитного поля статора.

При холостом ходе, т. е. при отсутствии нагрузки на валу, скольжение ничтожно мало и может быть принято равным нулю.

Скорость вращения ротора можно определить из следующих соотношений:

$$n_2 = n_1 - n_s = n_1(1 - S) = \frac{60f_1}{p}(1 - S). \quad (116)$$

Двигатель будет работать устойчиво с постоянной скоростью вращения ротора при равновесии моментов, т. е. если вращающий момент двигателя $M_{вр}$ будет равен тормозному моменту на валу двигателя $M_{тор}$, который развивает приемник механической энергии, например, резец токарного станка. Следовательно, можно записать:

$$M_{вр} = M_{тор}$$

Любой нагрузке машины соответствует определенное число оборотов ротора n_2 и определенное скольжение S .

Магнитное поле статора вращается относительно ротора с числом оборотов n_s и индуцирует в его обмотке э.д.с. E_2 , под действием которой по замкнутой обмотке ротора протекает ток силой I_2 .

Если нагрузка на валу машины увеличилась, т. е. возрос тормозной момент, то равновесие моментов будет нарушено, так как тормозной момент окажется больше вращающего. Это приведет к уменьшению скорости вращения ротора, а следовательно, к увеличению скольжения. С увеличением скольжения магнитное поле статора будет пересекать проводники обмотки ротора чаще, э.д.с. E_2 , индуцированная в обмотке ротора, возрастет, а в силу этого

увеличится как сила тока в роторе, так и развиваемый двигателем вращающий момент. Увеличение скольжения и силы тока в роторе будет происходить до значений, при которых вновь наступит равновесие моментов, т. е. вращающий момент станет равным тормозному.

Так же протекает процесс изменения числа оборотов ротора и развиваемого момента при уменьшении нагрузки двигателя. С уменьшением нагрузки на валу двигателя тормозной момент становится меньше вращающего, что приводит к увеличению скорости вращения ротора или к уменьшению скольжения. В результате уменьшаются э. д. с. и сила тока в обмотке ротора, а следовательно, и вращающий момент, который вновь становится равным тормозному моменту.

Магнитное поле статора пересекает проводники обмотки статора и индуцирует в ней э. д. с. E_1 , которая уравнивает приложенное напряжение сети U_1 .

Если пренебречь падением напряжения в сопротивлении обмотки статора, которое мало по сравнению с э. д. с., то между абсолютными значениями приложенного напряжения и э. д. с. обмотки статора можно допустить приближенное равенство, т. е.

$$U_1 = E_1.$$

Таким образом, при неизменном напряжении сети будет неизменна и э. д. с. обмотки статора. Следовательно, магнитный поток в воздушном зазоре машины, так же как в трансформаторе, при любом изменении нагрузки остается постоянным.

Ток обмотки ротора создает свое магнитное поле, которое направлено навстречу магнитному полю, образуемому током обмотки статора. Чтобы результирующий магнитный поток в машине оставался неизменным при любом изменении нагрузки двигателя, размагничивающее магнитное поле обмотки ротора должно быть уравновешено магнитным полем обмотки статора. Поэтому при увеличении силы тока в обмотке ротора увеличивается и сила тока в обмотке статора.

Таким образом, работа асинхронного двигателя принципиально подобна работе трансформатора, у которого при увеличении тока во вторичной обмотке увеличивается ток в первичной обмотке.

§ 93. ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Вращающий момент асинхронного двигателя создается при взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с токами в проводниках обмотки ротора. Поэтому вращающий момент зависит как от магнитного потока статора Φ_m , так и от силы тока в обмотке ротора I_2 . Однако в создании вращающего момента участвует только активная мощность, потребляемая машиной из сети. Вследствие этого вращающий момент зависит не от силы тока в обмотке ротора I_2 , а только от его активной составляю-

щей, т. е. $I_2 \cos \psi_2$, где ψ_2 — фазный угол между э. д. с. и током в обмотке ротора.

Таким образом, вращающий момент асинхронного двигателя определяется следующим выражением:

$$M = C \Phi_m I_2 \cos \psi_2, \quad (117)$$

где C — конструктивная постоянная машины, зависящая от числа ее полюсов и фаз, числа витков обмотки статора, конструктивного выполнения обмотки и принятой системы единиц.

При условии постоянства приложенного напряжения магнитный поток остается также почти постоянным при любом изменении нагрузки двигателя.

Таким образом, в выражении вращающего момента величины C и Φ_m постоянны и вращающий момент пропорционален только активной составляющей тока в обмотке ротора, т. е.

$$M \sim I_2 \cos \psi_2. \quad (118)$$

Изменение нагрузки или тормозного момента на валу двигателя изменяет и скорость вращения ротора и скольжения.

Изменение скольжения вызывает изменение как силы тока в роторе I_2 , так и ее активной составляющей $I_2 \cos \psi_2$.

Можно силу тока в роторе определить отношением э. д. с. к полному сопротивлению, т. е.

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{E_1}{\sqrt{r_2^2 + X_2^2}} \quad \text{и} \quad \cos \psi_2 = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + X_2^2}}, \quad (119)$$

где Z_2 , r_2 и X_2 — полное, активное и реактивное сопротивления фазы обмотки ротора.

Изменение скольжения изменяет частоту тока ротора. При неподвижном роторе ($n_2 = 0$ и $S = 1$) вращающееся поле с одинаковой скоростью пересекает проводники обмотки статора и ротора и частота тока в роторе равна частоте тока сети ($f_2 = f_1$). При уменьшении скольжения обмотка ротора пересекается магнитным полем с меньшей частотой, так что частота тока в роторе уменьшается. Когда ротор вращается синхронно с полем ($n_2 = n_1$ и $S = 0$), проводники обмотки ротора не пересекаются магнитным полем, так что частота тока в роторе равна нулю $f_2 = 0$. Таким образом, частота тока в роторе пропорциональна скольжению, т. е. $f_2 = S f_1$.

Активное сопротивление обмотки ротора почти не зависит от частоты, тогда как э. д. с. и реактивное сопротивление пропорциональны частоте, т. е. изменяются с изменением скольжения, и могут быть определены следующими выражениями:

$$E_2 = S E \quad \text{и} \quad X_2 = S X,$$

где E и X — э. д. с. и индуктивное сопротивление фазы обмотки неподвижного ротора соответственно.

Вращающий момент, развиваемый двигателем M , уравновешен тормозным моментом на валу M_2 и моментом, идущим на преодоление механических потерь M_0 , т. е.

$$M = M_2 + M_0 = \frac{P_2}{\Omega_2} + M_0 = \frac{P_2}{2\pi n_2/60} + M_0,$$

где P_2 — полезная мощность двигателя,
 Ω_2 — угловая скорость ротора.

При холостом ходе двигателя вращающий момент равен M_0 ; с увеличением нагрузки на валу этот момент также увеличивается, причем за счет некоторого уменьшения скорости ротора увеличение вращающего момента происходит быстрее, чем увеличение полезной мощности на валу.

Сила тока I_1 , потребляемого двигателем из сети, неравномерно изменяется с увеличением нагрузки на валу двигателя. При холостом ходе $\cos \phi$ мал и ток имеет большую реактивную составляющую и очень малую активную составляющую. При малых нагрузках на валу двигателя активная составляющая тока статора меньше реактивной составляющей, а потому изменение нагрузки, т. е. изменение активной составляющей тока, вызывает незначительное изменение силы тока I_1 (определяющейся в основном реактивной составляющей). При больших нагрузках активная составляющая тока статора становится больше реактивной и изменение нагрузки вызывает значительное изменение силы тока I_1 .

Потребляемая двигателем мощность P_1 при графическом изображении имеет вид почти прямой линии, незначительно отклоняющейся вверх при больших нагрузках, что объясняется увеличением потерь в обмотках статора и ротора с увеличением нагрузки.

Изменение коэффициента мощности при изменении нагрузки на валу двигателя происходит следующим образом. При холостом ходе $\cos \phi$ мал (порядка 0,2), так как активная составляющая тока статора, обусловленная потерями мощности в машине, мала по сравнению с реактивной составляющей этого тока, создающей магнитный поток. При увеличении нагрузки на валу $\cos \phi$ возрастает (достигая наибольшего значения 0,8—0,9) в результате увеличения активной составляющей тока статора. При очень больших нагрузках происходит некоторое уменьшение $\cos \phi$, так как вследствие значительного увеличения скольжения и частоты тока в роторе возрастает реактивное сопротивление обмотки ротора.

Кривая к. п. д. η имеет такой же вид, как в любой машине или трансформаторе. При холостом ходе к. п. д. равен нулю. С увеличением нагрузки на валу двигателя к. п. д. резко увеличивается, а затем уменьшается. Наибольшего значения к. п. д. достигает при такой нагрузке, когда потери мощности в стали и механические потери, не зависящие от нагрузки, равны потерям мощности в обмотках статора и ротора, зависящим от нагрузки.

§ 95. ПУСК В ХОД АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

При включении асинхронного двигателя в сеть переменного тока по обмоткам его статора и ротора будут протекать токи, в несколько раз больше номинальных. Это объясняется тем, что при неподвижном роторе вращающееся магнитное поле пересекает его обмотку с большой скоростью, равной скорости вращения магнитного поля в пространстве, и индуцирует в этой обмотке большую э. д. с. Эта э. д. с. создает большой ток в цепи ротора, что вызывает возникновение соответствующего тока и в обмотке статора.

При увеличении числа оборотов ротора скольжение уменьшается, что приводит к уменьшению э. д. с. и тока в обмотке ротора. Это, в свою очередь, вызывает уменьшение тока в обмотке статора.

Большой пусковой ток нежелателен как для двигателя, так и для источника тока, от которого двигатель получает энергию. При частых пусках большой пусковой ток приводит к резкому повышению температуры обмоток двигателя, что может вызвать преждевременное старение их изоляции. В сети при больших токах понижается напряжение, которое оказывает влияние на работу других приемников энергии, включенных в эту же сеть. Поэтому прямой пуск двигателя непосредственным включением его в сеть допускается только в том случае, когда мощность двигателя намного меньше мощности источника тока, питающего сеть.

Если мощность двигателя соизмерима с мощностью источника тока, то необходимо уменьшить ток, потребляемый этим двигателем при пуске в ход.

Двигатели с фазным ротором обладают очень хорошими пусковыми свойствами. Для уменьшения пускового тока обмотку ротора замыкают на активное сопротивление, называемое пусковым реостатом (рис. 116). При включении такого сопротивления в цепь обмотки ротора сила тока в ней уменьшается, а следовательно, уменьшается сила тока как в обмотке статора, так и потребляемого двигателя из сети. Кроме того, увеличится активная составляющая тока ротора и, следовательно, вращающий момент, развиваемый двигателем при пуске в ход.

Пусковые реостаты имеют несколько контактов, поэтому можно постепенно уменьшать сопротивление, введенное в цепь обмотки ротора. После достижения ротором нормальной скорости реостат полностью выводится, т. е. обмотку ротора замыкают накоротко.

При нормальной скорости ротора скольжение мало и э. д. с., индуцируемая в его обмотке, также мала. Поэтому никакие добавочные сопротивления в цепи ротора не нужны.

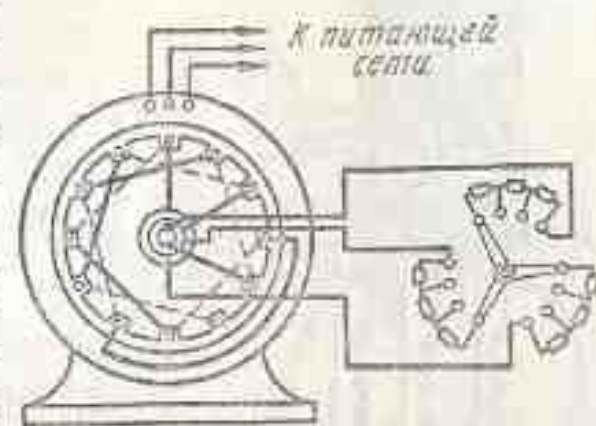


Рис. 116. Схема включения пускового реостата в цепь фазного ротора асинхронного двигателя.

Пусковые реостаты работают непродолжительное время в процессе разгона двигателя и рассчитываются на кратковременное действие. Если оставить реостат включенным длительное время, то он выйдет из строя.

Двигатели с короткозамкнутым ротором при малой мощности их по сравнению с мощностью источника тока пускают в ход непосредственным включением в сеть. При большой же мощности

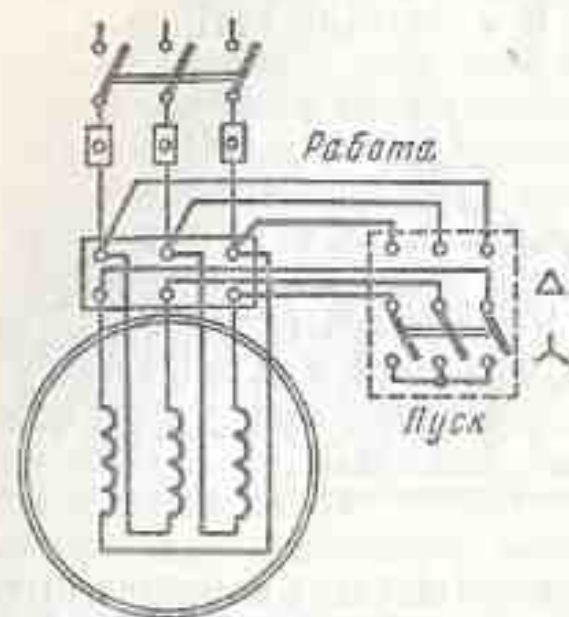


Рис. 117. Схема пуска в ход асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором переключением обмоток со звезды на треугольник

когда пусковой момент может быть небольшим.

Часто применяют пуск в ход двигателей посредством переключения обмоток статора со звезды на треугольник (рис. 117). В момент пуска обмотки статора соединяют звездой, а после того как двигатель разовьет скорость, близкую к нормальной, их переключают треугольником. При таком способе пуска двигателя в ход пусковой ток в сети уменьшается примерно в три раза по сравнению с пусковым током, который потреблялся бы двигателем, если бы при пуске обмотки статора были соединены треугольником.

Этот способ пуска можно применять для двигателя, обмотки статора которого при питании от сети данного напряжения должны быть соединены треугольником.

§ 96. ДВИГАТЕЛИ С УЛУЧШЕННЫМИ ПУСКОВЫМИ СВОЙСТВАМИ

Простота конструкции и надежность в эксплуатации двигателей с короткозамкнутым ротором являются их очень существенным достоинством, благодаря чему они получили очень широкое применение в промышленности. Однако эти двигатели имеют плохие пусковые характеристики.

Значительное улучшение пусковых характеристик асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором достигается изменением конструкции ротора: используют роторы с двойной короткозамкнутой обмоткой и с глубокими пазами.

Ротор с двойной короткозамкнутой обмоткой был впервые предложен М. О. Доливо-Добровольским в 1889 г. Он имеет две короткозамкнутые обмотки, выполненные в виде белчиных клеток (рис. 118).

Число пазов верхней A и нижней B клеток может быть одинаково или различно. Наружная обмотка A выполнена из стержней малого поперечного сечения, а внутренняя обмотка B — из стержней большого поперечного сечения. Поэтому активное сопротивление обмотки A оказывается значительно большим, чем активное сопротивление обмотки B ($r_A \gg r_B$). Вследствие того что стержни внутренней обмотки B глубоко погружены в тело ротора и окружены сталью, индуктивное сопротивление внутренней обмотки значительно больше, чем индуктивное сопротивление внешней обмотки ($X_B \gg X_A$).

Принцип действия этого двигателя состоит в следующем. В момент включения двигателя в сеть ротор неподвижен и частота тока в роторе равна частоте тока сети $f_2 = f_1$. Ток в обмотках A и B распределяется обратно пропорционально их полным сопротивлениям.

Так как реактивные сопротивления обмоток асинхронных машин значительно больше их активных сопротивлений, то при пуске в ход распределение тока между обмотками A и B примерно обратно пропорционально их индуктивным сопротивлениям. Поэтому при пуске в ход ток в основном протекает по проводникам внешней обмотки A , имеющей меньшее индуктивное и большее активное сопротивление. Эта обмотка называется *пусковой*.

В рабочем режиме скольжение мало и, следовательно, частота тока в роторе также мала ($f_2 \approx 0$). Поэтому индуктивные сопротивления обмоток не имеют значения и токи в обмотках A и B обратно пропорциональны их активным сопротивлениям.

Таким образом, в рабочем режиме ток в основном протекает по проводникам внутренней обмотки B , имеющим меньшее активное сопротивление. Эта обмотка называется *рабочей*. При такой конструкции ротора увеличивается активное сопротивление его обмоток в момент пуска в ход двигателя, что уменьшает пусковой ток и увеличивает пусковой момент так же, как включение пускового реостата в цепь фазного ротора.

В двигателях с глубокими пазами на роторе короткозамкнутая обмотка ротора выполняется в виде тонких и высоких полос (рис. 119). При такой конструкции обмотки происходит отеснение тока к верхней части проводников вследствие того, что нижние

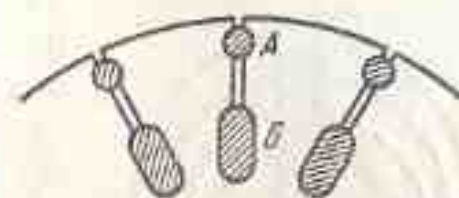


Рис. 118. Схема устройства ротора с двойной короткозамкнутой обмоткой

части проводников сцеплены с большим числом магнитных линий потока рассеяния, чем верхние части.

Таким образом, ток, протекающий по проводникам, стремится сконцентрироваться преимущественно в верхней их части, что равносильно уменьшению поперечного сечения или увеличению активного сопротивления этих проводников.

Это явление оттеснения тока в верхние части проводников особенно сильно сказывается в момент включения двигателя, когда частота тока в роторе равна частоте тока сети, и, следовательно, при пуске в ход повышается активное сопротивление обмотки ротора, что увеличивает пусковой момент. При увеличении скорости вращения ротора частота тока в его обмотке уменьшается и ток более равномерно распределяется по сечению стержней, и при нормальной скорости вращения неравномерность распределения тока по поперечному сечению стержней почти полностью исчезает.

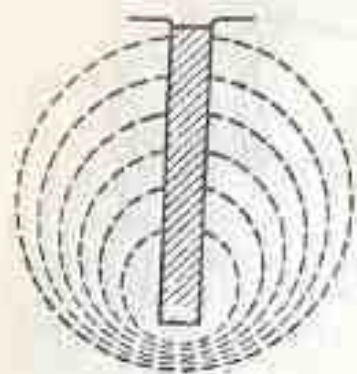


Рис. 119. Схема устройства ротора с глубокими пазами

Пусковой момент двигателей этого типа $M_{п} = (1 \div 1,5) M_{н}$, а пусковой ток $I_{п} = (4 \div 5) I_{н}$.

Таким образом, в двигателях с двойной короткозамкнутой обмоткой и с глубокими пазами пусковые моменты больше и пусковые токи меньше, чем у обычных короткозамкнутых двигателей.

Однако рабочие характеристики этих двигателей несколько хуже, чем обычных короткозамкнутых двигателей — несколько меньше $\cos \phi$, к. п. д. и максимальный момент, так как больше потока рассеяния, т. е. больше индуктивные сопротивления обмоток ротора.

§ 97. РЕГУЛИРОВАНИЕ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Число оборотов ротора в минуту определяется следующим выражением:

$$n_2 = n_1 (1 - S) = \frac{60f_1}{p} (1 - S). \quad (122)$$

Из выражения (122) видно, что число оборотов ротора можно регулировать изменением любой из трех величин, определяющих число оборотов ротора, т. е. изменением частоты тока сети f_1 , числа пар полюсов p и скольжения S .

Регулирование скорости асинхронных двигателей изменением частоты тока сети сложно, так как необходим какой-либо регулирующий преобразователь частоты или генератор. Поэтому такой способ не имеет широкого применения.

Изменение числа полюсов машины возможно либо выполнением на статоре нескольких (обычно двух) обмоток с различным чис-

лом полюсов, либо одной обмотки, допускающей переключение на различное число полюсов. Может быть помещено на статоре две обмотки, каждая из которых допускает переключение на различное число полюсов.

На рис. 120, а схематически показаны две катушки одной фазы, соединенные последовательно. Ток, протекая по ним, создает магнитное поле с четырьмя полюсами.

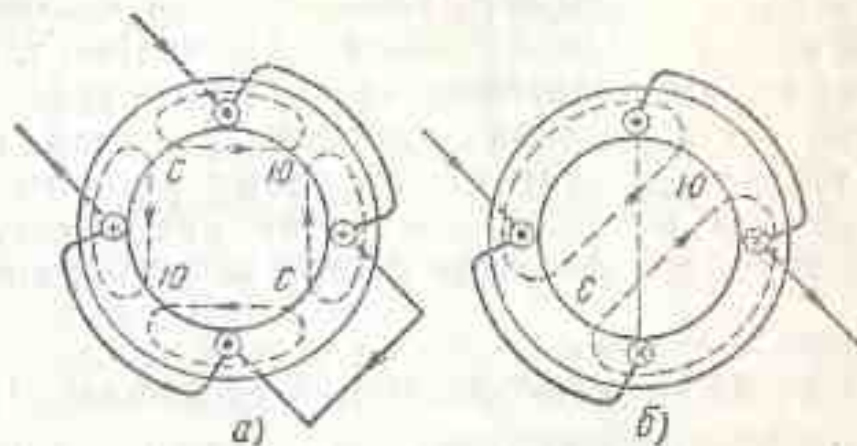


Рис. 120. Схема переключения обмоток статора на разное число полюсов: а — четыре полюса, б — два полюса

Если изменить направление тока в одной из катушек, включив ее встречно с другой, то обмотка будет создавать двухполюсное магнитное поле (рис. 120, б). При изменении числа полюсов обмотки статора изменится скорость вращения его магнитного поля, а следовательно, и скорость вращения ротора двигателя. Этот способ регулирования скорости асинхронного двигателя экономичен, но недостатком его является ступенчатое изменение скорости. Кроме того, стоимость такого двигателя значительно возрастает вследствие усложнения обмотки статора и увеличения габаритов машин.

Регулирование скорости изменением числа полюсов применяется в двигателях с короткозамкнутым ротором; в двигателях с контактными кольцами этот способ не используется, так как здесь одновременно с изменением числа полюсов обмотки статора необходимо в той же мере изменить число полюсов обмотки вращающегося ротора, что весьма сложно.

Заводы СССР выпускают двух-, трех- и четырехскоростные двигатели, например, на синхронные скорости вращения 500—750—1000—1500 об/мин. Такие двигатели имеют на статоре две обмотки, каждая из которых допускает переключение на различное число полюсов.

Изменить скольжение можно введением в цепь обмотки ротора регулировочного реостата, а также изменением напряжения сети. При изменении напряжения питающей сети изменяется вращающий момент двигателя, пропорциональный квадрату напряжения. При уменьшении вращающего момента начнет уменьшаться число оборотов ротора, т. е. увеличится скольжение.

Регулировочный реостат включается в цепь обмотки фазного ротора подобно пусковому реостату, но в отличие от пускового этот реостат рассчитывается на длительное прохождение тока.

При включении регулировочного реостата сила тока в роторе уменьшится, что вызовет уменьшение вращающего момента двигателя и, следовательно, уменьшение скорости вращения или увеличение скольжения. При увеличении скольжения увеличивается э.д.с. и ток в роторе. Скорость вращения или скольжения будет изменяться до восстановления равновесия моментов, т. е. пока сила тока в роторе не примет своего начального значения.

Этот способ регулирования скорости вращения может быть использован только в двигателях с фазным ротором и, несмотря на то, что является неэкономичным (так как в регулировочном реостате происходит значительная потеря энергии), имеет широкое применение.

§ 98. ОДНОФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Однофазные асинхронные двигатели широко применяют при небольших мощностях (до 1—2 кВт). Такой двигатель отличается от обычного трехфазного двигателя тем, что на статоре его помещается однофазная обмотка. Поэтому любой трехфазный асинхронный двигатель может быть использован в качестве однофазного. Ротор однофазного асинхронного двигателя может иметь фазную или короткозамкнутую обмотку.

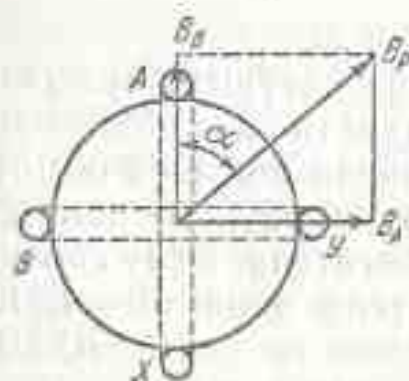


Рис. 121. Магнитное поле симметричной двухфазной системы катушек

Особенностью однофазных асинхронных двигателей является отсутствие начального или пускового момента, т. е. при включении такого двигателя в сеть ротор его будет оставаться неподвижным.

Если же под действием какой-либо внешней силы вывести ротор из состояния покоя, то двигатель будет развивать вращающий момент.

Отсутствие начального момента является существенным недостатком однофазных асинхронных двигателей. Поэтому они всегда снабжаются пусковым устройством.

Наиболее простым пусковым устройством являются две обмотки, помещенные на статоре, сдвинутые друг относительно друга на половину полюсного деления (90° электрических). Эти обмотки катушек питаются от симметричной двухфазной сети, т. е. напряжения, приложенные к обмоткам катушек, равны между собой и сдвинуты на четверть периода по фазе. В этом случае токи, протекающие по катушкам, окажутся также сдвинутыми по фазе на четверть периода, что в дополнение к пространственному сдвигу катушек дает возможность получить вращающееся магнитное поле. При наличии вращающегося магнитного поля двигатель развивает пусковой момент.

Простейшую двухфазную обмотку можно представить в виде двух катушек (рис. 121), оси которых смещены в пространстве на 90° (электрических). Если по этим катушкам, имеющим одинаковое число витков, пропустить равные по величине и сдвинутые по фазе на четверть периода синусоидальные токи, т. е.

$$i_A = I_m \sin \omega t; \quad (123)$$

$$i_B = I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = I_m \cos \omega t, \quad (124)$$

то магнитные поля этих катушек будут также синусоидальными и сдвинуты по фазе на четверть периода, т. е.

$$B_A = B_m \sin \omega t \text{ и } B_B = B_m \cos \omega t. \quad (125)$$

При этом вектор B_A направлен по оси катушки $A-X$, а вектор B_B — по оси катушки $B-Y$.

В любой момент результирующее магнитное поле равно геометрической сумме магнитных полей катушек A и B , т. е.

$$B_p = \sqrt{B_A^2 + B_B^2} = \sqrt{(B_m \sin \omega t)^2 + (B_m \cos \omega t)^2} = B_m.$$

Следовательно, в любой момент результирующее магнитное поле двухфазной обмотки имеет неизменное значение, равное амплитуде поля одной фазы.

Можно записать:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_A}{B_B} = \frac{B_m \sin \omega t}{B_m \cos \omega t} = \operatorname{tg} \omega t,$$

откуда $\alpha = \omega t$, т. е. угол между вектором результирующего поля и вертикальной осью линейно изменяется во времени и, следовательно, этот вектор вращается с постоянной скоростью, равной

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}.$$

В действительности двухфазная сеть обычно отсутствует, и пуск однофазного двигателя осуществляется включением двух катушек в одну общую для них однофазную сеть. Для получения угла сдвига фаз между токами в катушках, примерно равного $\pm \frac{\pi}{2}$ четверти периода, одну из катушек (рабочую) включают в сеть непосредственно или с пусковым активным сопротивлением, а вторую катушку (пусковую) — через индуктивную катушку (рис. 122, а) или конденсатор (рис. 122, б).

Пусковая обмотка включается только на период пуска в ход. В момент, когда ротор приобретает определенную скорость, пусковая обмотка отключается от сети и двигатель работает как однофазный.

Отключает пусковую обмотку центробежный выключатель или специальное реле.

В качестве однофазного двигателя может быть использован любой трехфазный асинхронный двигатель. При работе трехфаз-

Регулировочный реостат включается в цепь обмотки фазного ротора подобно пусковому реостату, но в отличие от пускового этот реостат рассчитывается на длительное прохождение тока.

При включении регулировочного реостата сила тока в роторе уменьшится, что вызовет уменьшение вращающего момента двигателя и, следовательно, уменьшение скорости вращения или увеличение скольжения. При увеличении скольжения увеличивается э. д. с. и ток в роторе. Скорость вращения или скольжения будет изменяться до восстановления равновесия моментов, т. е. пока сила тока в роторе не примет своего начального значения.

Этот способ регулирования скорости вращения может быть использован только в двигателях с фазным ротором и, несмотря на то, что является неэкономичным (так как в регулировочном реостате происходит значительная потеря энергии), имеет широкое применение.

§ 98. ОДНОФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Однофазные асинхронные двигатели широко применяют при небольших мощностях (до 1—2 кВт). Такой двигатель отличается от обычного трехфазного двигателя тем, что на статоре его помещается однофазная обмотка. Поэтому любой трехфазный асинхронный двигатель может быть использован

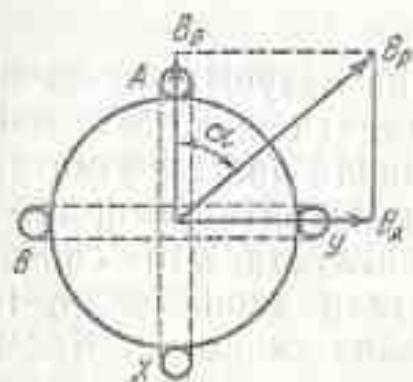


Рис. 121. Магнитное поле симметричной двухфазной системы катушек

в качестве однофазного. Ротор однофазного асинхронного двигателя может иметь фазную или короткозамкнутую обмотку.

Особенностью однофазных асинхронных двигателей является отсутствие начального или пускового момента, т. е. при включении такого двигателя в сеть ротор его будет оставаться неподвижным.

Если же под действием какой-либо внешней силы вывести ротор из состояния покоя, то двигатель будет развивать вращающий момент.

Отсутствие начального момента является существенным недостатком однофазных асинхронных двигателей. Поэтому они всегда снабжаются пусковым устройством.

Наиболее простым пусковым устройством являются две обмотки, помещенные на статоре, сдвинутые друг относительно друга на половину полюсного деления (90° электрических). Эти обмотки катушек питаются от симметричной двухфазной сети, т. е. напряжения, приложенные к обмоткам катушек, равны между собой и сдвинуты на четверть периода по фазе. В этом случае токи, протекающие по катушкам, окажутся также сдвинутыми по фазе на четверть периода, что в дополнение к пространственному сдвигу катушек дает возможность получить вращающееся магнитное поле. При наличии вращающегося магнитного поля двигатель развивает пусковой момент.

Простейшую двухфазную обмотку можно представить в виде двух катушек (рис. 121), оси которых смещены в пространстве на 90° (электрических). Если по этим катушкам, имеющим одинаковое число витков, пропустить равные по величине и сдвинутые по фазе на четверть периода синусоидальные токи, т. е.

$$i_A = I_m \sin \omega t; \quad (123)$$

$$i_B = I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = I_m \cos \omega t, \quad (124)$$

то магнитные поля этих катушек будут также синусоидальными и сдвинуты по фазе на четверть периода, т. е.

$$B_A = B_m \sin \omega t \text{ и } B_B = B_m \cos \omega t. \quad (125)$$

При этом вектор B_A направлен по оси катушки $A - X$, а вектор B_B — по оси катушки $B - Y$.

В любой момент результирующее магнитное поле равно геометрической сумме магнитных полей катушек A и B , т. е.

$$B_p = \sqrt{B_A^2 + B_B^2} = \sqrt{(B_m \sin \omega t)^2 + (B_m \cos \omega t)^2} = B_m.$$

Следовательно, в любой момент результирующее магнитное поле двухфазной обмотки имеет неизменное значение, равное амплитуде поля одной фазы.

Можно записать:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_A}{B_B} = \frac{B_m \sin \omega t}{B_m \cos \omega t} = \operatorname{tg} \omega t,$$

откуда $\alpha = \omega t$, т. е. угол между вектором результирующего поля и вертикальной осью линейно изменяется во времени и, следовательно, этот вектор вращается с постоянной скоростью, равной

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}.$$

В действительности двухфазная сеть обычно отсутствует, и пуск однофазного двигателя осуществляется включением двух катушек в одну общую для них однофазную сеть. Для получения угла сдвига фаз между токами в катушках, примерно равного $\pm \frac{\pi}{2}$ четверти периода, одну из катушек (рабочую) включают в сеть непосредственно или с пусковым активным сопротивлением, а вторую катушку (пусковую) — через индуктивную катушку (рис. 122, а) или конденсатор (рис. 122, б).

Пусковая обмотка включается только на период пуска в ход. В момент, когда ротор приобретает определенную скорость, пусковая обмотка отключается от сети и двигатель работает как однофазный.

Отключает пусковую обмотку центробежный выключатель или специальное реле.

В качестве однофазного двигателя может быть использован любой трехфазный асинхронный двигатель. При работе трехфаз-

ного двигателя в качестве однофазной рабочей или главной обмотки, состоящая из двух последовательно соединенных фаз трехфазного двигателя, включается непосредственно в однофазную сеть, третья фаза, являющаяся пусковой или вспомогательной обмоткой, включается в ту же сеть через пусковой элемент — сопротивление, индуктивность или конденсатор.

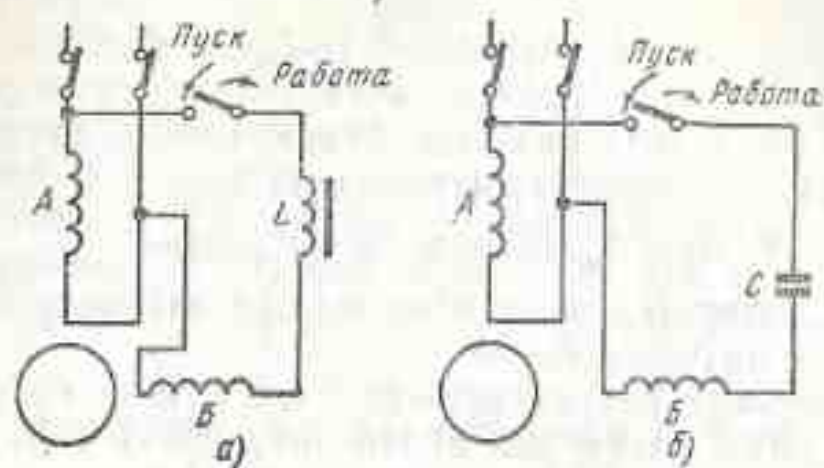


Рис. 122. Схема пуска однофазного двигателя при включении в цепь пусковой обмотки: а — индуктивности, б — емкости

В однофазных двигателях малой мощности в качестве пусковой обмотки используют короткозамкнутые витки, укладываемые на полюсах статора. Статоры таких двигателей выполняют с явно выраженными полюсами (рис. 123), и рабочая обмотка укладывается на полюсы в виде катушек.

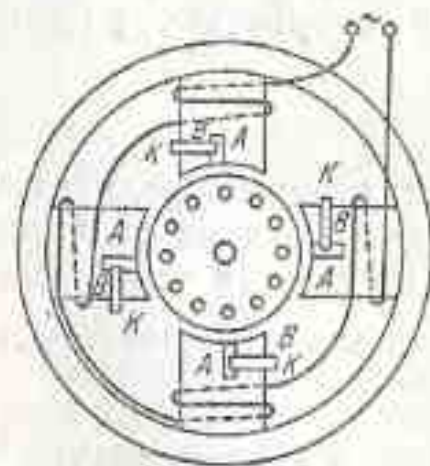


Рис. 123. Короткозамкнутая пусковая обмотка

Каждый полюс разделен на две части, на одной из которых помещаются короткозамкнутые катушки. В этих катушках создаются токи, препятствующие прохождению магнитного потока в части полюса В, вследствие чего магнитный поток в части полюса А достигает максимального значения раньше, чем в части полюса В. Эти два не совпадающие по фазе потока создают вращающееся магнитное поле.

В короткозамкнутых катушках возникают добавочные потери, что снижает к. п. д. двигателя. Поэтому такой способ пуска в ход используют только в двигателях очень малых мощностей (до 100 Вт), где значение к. п. д. не является первостепенным.

Конденсаторный двигатель представляет собой однофазный асинхронный двигатель с двумя обмотками на статоре и короткозамкнутым ротором (рис. 124, а). В конденсаторных (двухфазных) двигателях вспомогательная обмотка рассчитана на длительное прохождение тока и остается включенной не только при пуске в ход двигателя, но и при работе. Наличие вращающегося поля при

работе двигателя улучшает его рабочие свойства в сравнении с однофазными.

Круговое вращающееся магнитное поле в конденсаторном двигателе будет получено в случае равенства намагничивающих сил двух катушек, причем намагничивающая сила катушки K_2 должна опережать во времени намагничивающую силу катушки K_1 на $\frac{\pi}{2}$.

Это происходит при некоторой определенной нагрузке двигателя. С изменением нагрузки нарушится условие получения кругового вращающегося поля.

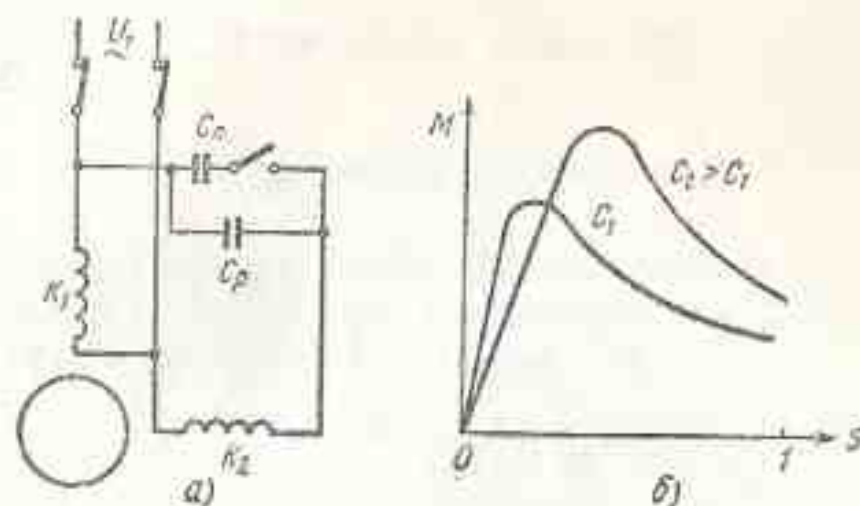


Рис. 124. Схема конденсаторного двигателя (а) и зависимость его вращающегося момента от скольжения при различной емкости конденсаторной батареи (б)

При этом, помимо кругового прямого поля, появляется обратное вращающееся поле, создающее тормозной момент, который уменьшает вращающий момент машины.

С увеличением емкости конденсатора увеличится и ток, т. е. возрастет нагрузка двигателя, при которой будет создано круговое вращающееся поле. Поэтому увеличение емкости конденсаторной батареи вызовет увеличение максимального момента машины, причем максимальный момент сместится в область больших нагрузок, т. е. больших скольжений (рис. 124, б).

При увеличении емкости возрастает также и пусковой момент двигателя. Однако увеличение емкости батарей конденсаторов в рабочем режиме нежелательно, так как это ведет к снижению скорости и к. п. д. двигателя. Поэтому конденсаторные двигатели выполняют с двумя батареями конденсаторов — с постоянно включенной или рабочей емкостью C_p и пусковой емкостью C_n , включаемой только на период пуска в ход двигателя.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия асинхронного двигателя.
2. Как изменить направление вращения ротора?
3. Каким выражением определяется э. д. с. фазы обмотки машины переменного тока?

4. Объясните устройство асинхронного двигателя с фазным и короткозамкнутым роторами.
5. От чего зависит вращающий момент асинхронного двигателя?
6. Если напряжение питающей сети понизится на 10%, то в какой мере уменьшится вращающий момент?
7. Объясните рабочие характеристики асинхронного двигателя.
8. Как осуществляется пуск в ход асинхронных двигателей?
9. Каково устройство двигателей с улучшенными пусковыми свойствами?
10. Каким образом регулируется скорость трехфазных двигателей?
11. Как происходит пуск в ход однофазных двигателей?
12. Почему конденсаторные двигатели снабжены двумя батареями конденсаторов?

ГЛАВА IX СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

§ 99. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В синхронных машинах число оборотов ротора равно числу оборотов магнитного поля статора и, следовательно, определяется частотой тока сети и числом пар полюсов, т. е.

$$n = \frac{60f}{p} \quad \text{и} \quad f = \frac{pn}{60} \quad (126)$$

Как и всякая электрическая машина, синхронная машина обратима, т. е. может работать как генератором, так и двигателем.

Синхронные генераторы широко применяются. Электрическая энергия вырабатывается синхронными генераторами, первичными двигателями которых являются либо гидравлические, либо паровые турбины, либо двигатели внутреннего сгорания.

Синхронные двигатели используют в установках средней и большой мощности. Основным достоинством их является высокий коэффициент мощности. У этих двигателей $\cos \varphi$ может быть равен единице, и, более того, они могут работать с потреблением опережающего тока из сети, представляя собой емкость для сети. Это свойство синхронных двигателей широко используется. Синхронный двигатель, потребляющий опережающий ток из сети, компенсирует реактивную мощность других приемников энергии, включенных в эту сеть, и повышает коэффициент мощности всего предприятия. Магнитное поле в машине создается постоянным током, протекающим по обмотке возбуждения. Потребность в источнике постоянного тока для питания обмотки возбуждения является очень существенным недостатком синхронных машин.

Обычно обмотки возбуждения получают энергию от возбудителя, который представляет собой генератор постоянного тока параллельного возбуждения. Возбудитель находится на одном валу с рабочей машиной, и мощность его составляет малую величину, порядка 1—5% мощности синхронной машины, возбуждаемой им. При небольшой мощности широко используются схемы питания обмоток возбуждения синхронных машин из сети переменного тока через полупроводниковые выпрямители. При вращении ротора маг-

нитные линии потока остаточного магнетизма пересекают проводники обмотки статора и индуцируют в них э. д. с. Вызванный этой э. д. с. ток посредством трансформатора и полупроводниковых вентилей преобразуется в постоянный и протекает через обмотку возбуждения. Вследствие этого происходит усиление магнитного поля генератора и его возбуждение до номинального напряжения.

§ 100. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

В генераторах обмотка состоит из большого числа проводов, которые, соединяясь между собой, образуют витки и катушки. Простейшим генератором может быть виток из провода 1 и 2, вращающийся в магнитном поле (рис. 125). Магнитное поле возбуждается током обмотки возбуждения, помещенной на полюсах статора $N-S$.

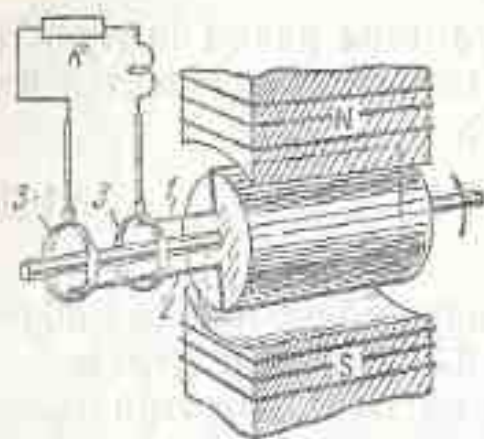


Рис. 125. Схема простейшего генератора переменного тока

При вращении витка проводники 1 и 2 пересекают магнитные линии магнитного поля полюсов $N-S$, вследствие чего в витке будет индуцироваться э. д. с.

Концы витка соединены с кольцами 3, вращающимися вместе с витком. Если на кольцах поместить неподвижные щетки и соединить их с приемником электрической энергии, то по замкнутой цепи, состоящей из витка, колец, щеток и приемника энергии, потечет электрический ток под действием э. д. с., созданной в витке.

Полученная в таком простейшем генераторе э. д. с. будет непрерывно изменять-

ся в зависимости от положения витка в магнитном поле. В момент, изображенный на рис. 125, проводники 1 и 2 находятся под серединами полюсов и при вращении витка пересекают в единицу времени наибольшее число магнитных линий магнитного поля. Следовательно, в данный момент индуцируемая в витке э. д. с. будет иметь наибольшее значение.

В дальнейшем при повороте витка изменится число магнитных линий магнитного поля, пересекаемых в единицу времени проводниками 1 и 2. В момент, соответствующий повороту витка на 90° в пространстве, проводники витка будут перемещаться в вертикальном направлении, совпадающем с направлением магнитных линий магнитного поля. Следовательно, проводники 1 и 2 не пересекают магнитных линий и э. д. с. в витке равна нулю.

При повороте витка на угол, больший 90° , изменится направление перемещения этих проводников в магнитном поле, а следовательно и направление э. д. с., индуцируемой в витке.

Если магнитное поле между полюсами N и S распределяется равномерно, то э. д. с. будет меняться во времени синусоидально. За один оборот витка в пространстве э. д. с., индуцируемая в нем, претерпевает один период изменения.

Если виток вращается при помощи какого-либо первичного двигателя с постоянным числом оборотов n в минуту, то в этом витке индуцируется переменная э. д. с. с частотой

$$f = \frac{n}{60} \quad (127)$$

§ 101. УСТРОЙСТВО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Возникновение э. д. с. в проводниках возможно как при перемещении этих проводников в неподвижном магнитном поле, так и при перемещении магнитных линий магнитного поля относительно неподвижных проводников. В первом случае полюсы, т. е. индуцирующая часть машины, возбуждающая магнитное поле, помещаются на неподвижной части машины (на статоре), а индуцируемая часть (якорь), т. е. проводники, в которых создается э. д. с., — на вращающейся части машины (на роторе). Во втором случае полюсы помещаются на роторе, а якорь — на статоре.

Выше мы рассмотрели принцип действия синхронного генератора с неподвижными полюсами и вращающимся якорем. В таком генераторе энергия, вырабатываемая им, передается приемнику энергии посредством скользящих контактов — контактных колец и щеток.

Скользящий контакт в цепи большой мощности создает значительные потери энергии, а при высоких напряжениях наличие такого контакта крайне нежелательно. Поэтому генераторы с вращающимся якорем и неподвижными полюсами выполняют только при низких напряжениях (до 380/220 в) и небольших мощностях (до 15 ква).

Наиболее широкое применение получили синхронные генераторы, в которых полюсы помещены на роторе, а якорь — на статоре.

Ток возбуждения протекает по обмотке возбуждения, которая представляет собой последовательно соединенные катушки, помещенные на полюсы ротора.

Концы обмотки возбуждения соединены с контактными кольцами, которые крепятся на валу машины. На кольцах помещаются неподвижные щетки, посредством которых в обмотку возбуждения подводится постоянный ток от постороннего источника энергии — генератора постоянного тока, называемого возбудителем.

На рис. 126 показан общий вид синхронного генератора с возбудителем.

Устройство статора синхронного генератора аналогично устройству статора асинхронной машины.

Ротор синхронных генераторов выполняют либо с явно выраженными (выступающими) полюсами, либо с неявно выраженными полюсами, т. е. без выступающих полюсов.

В машинах с относительно малой скоростью вращения (при большом числе полюсов) роторы выполняют с явно выраженными

полюсами (рис. 127, а), равномерно расположенными по окружности ротора.

Полюс состоит из сердечника 1, полюсного наконечника 2 и катушки обмотки возбуждения 3, помещаемой на сердечнике полюса.

Первичные двигатели синхронных генераторов с явно выраженными полюсами обычно представляют собой гидравлические

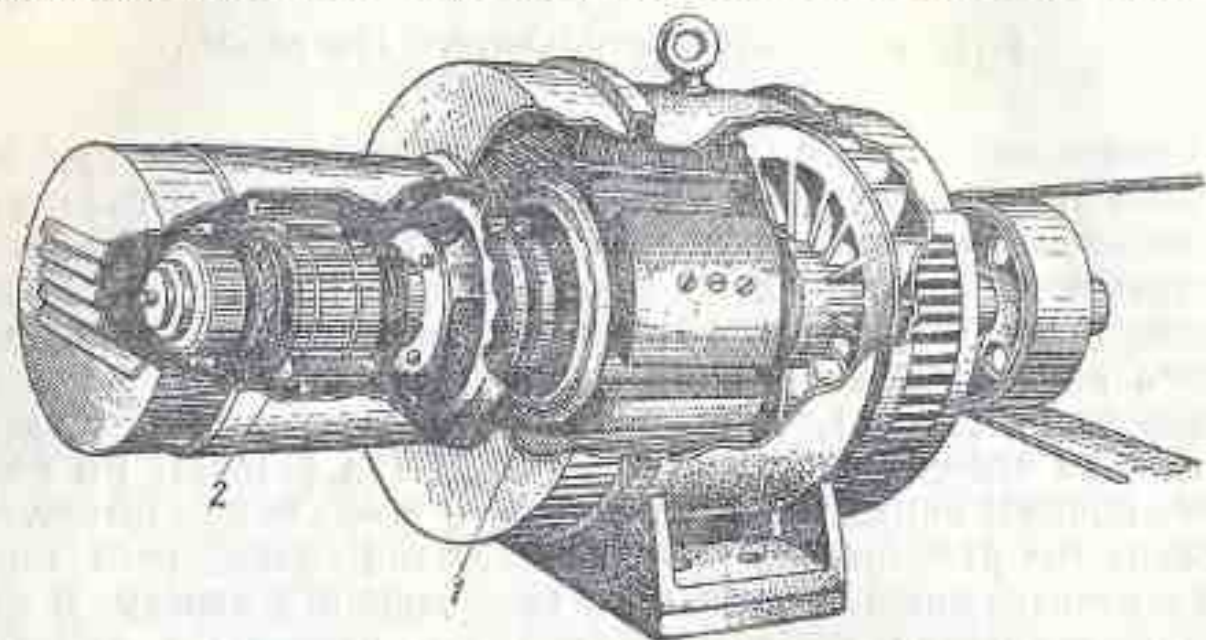


Рис. 126. Устройство синхронного генератора:
1 — синхронный генератор, 2 — возбудитель

турбины, являющиеся тихоходными машинами. Поэтому синхронные генераторы с явно выраженными полюсами называются *гидрогенераторами*.

При большой скорости вращения такое устройство ротора не может обеспечить нужной механической прочности и поэтому у вы-

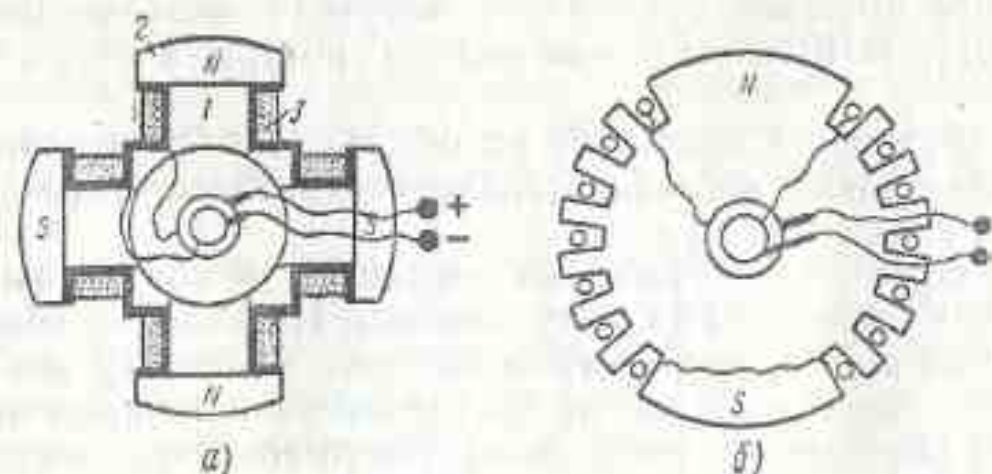


Рис. 127. Ротор синхронной машины:
а — с явно выраженными полюсами, б — с неявно выраженными полюсами

сокоскоростных машин роторы выполняют с неявно выраженными полюсами (рис. 127, б).

Сердечники роторов с неявно выраженными полюсами обычно изготавливают из цельных поковок, на поверхности которых фрезеруются пазы. После укладки обмоток возбуждения на роторе пазы

его забиваются клиньями, а лобовые соединения обмотки возбуждения укрепляются стальными бандажками, помещенными на торцевых частях ротора. При такой конструкции ротора допускаются большие окружные скорости (до 180—200 м/сек).

Для генераторов с неявно выраженными полюсами первичными двигателями обычно являются паровые турбины, принадлежащие к числу быстроходных машин. Поэтому синхронные генераторы с неявно выраженными полюсами называются *турбогенераторами*.

§ 102. РАБОТА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ

Если синхронный генератор не нагружен, т. е. работает вхолостую, то тока в обмотках статора нет. Магнитный поток полюсов, созданный током возбуждения, индуктирует в трехфазной обмотке статора э. д. с.

При нагрузке генератора в обмотке статора протекает ток. При симметричной нагрузке токи в фазах обмотки статора равны и сдвинуты на $1/3$ периода. Токи статора создают вращающееся магнитное поле, скорость вращения которого

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60}{p} \cdot \frac{np}{60} = n,$$

т. е. магнитное поле, созданное токами в обмотке статора, вращается синхронно с магнитным полем полюсов.

В обмотке статора синхронного генератора создается э. д. с., величина которой зависит от магнитного потока полюсов. Если магнитный поток полюсов очень мал, то и э. д. с. также мала. При увеличении магнитного потока возрастает и э. д. с. машины. Таким образом, при постоянной скорости вращения ротора э. д. с. пропорциональна магнитному потоку, который возбуждается постоянным током, протекающим по проводникам обмотки возбуждения. Если повысить ток в обмотке возбуждения, то возрастет и магнитный поток полюсов, что вызовет увеличение э. д. с. машины. Следовательно, изменение тока в обмотке возбуждения вызывает соответствующее изменение э. д. с. машины и позволяет регулировать напряжение на зажимах генератора.

Если синхронный генератор не нагружен (работает вхолостую), то тока в обмотках статора нет и напряжение на зажимах генератора равно э. д. с., индуктированной в обмотке статора.

При нагрузке генератора ток в обмотке статора не равен нулю и, следовательно, напряжение на зажимах генератора не равно э. д. с., так как в сопротивлении (активном и реактивном) обмотки статора возникает падение напряжения. Кроме того, токи, протекающие по обмоткам статора, создают поток реакции якоря, который воздействует на поток полюсов, так что при нагрузке магнитный поток не будет равен магнитному потоку полюсов при холостой работе генератора. Поэтому изменение нагрузки, т. е. тока в статоре генератора, будет вызывать изменение напряжения на

зажимах генератора в случае, если ток в обмотке возбуждения остается неизменным.

На рис. 128 изображены внешние характеристики синхронного генератора при активной и реактивной нагрузках. Эти характеристики показывают зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при неизменных скорости вращения ротора и токе возбуждения. Различный вид этих характеристик при активной, индуктивной и емкостной нагрузках объясняется не одинаковым воздействием поля реакции якоря на магнитный поток полюсов.

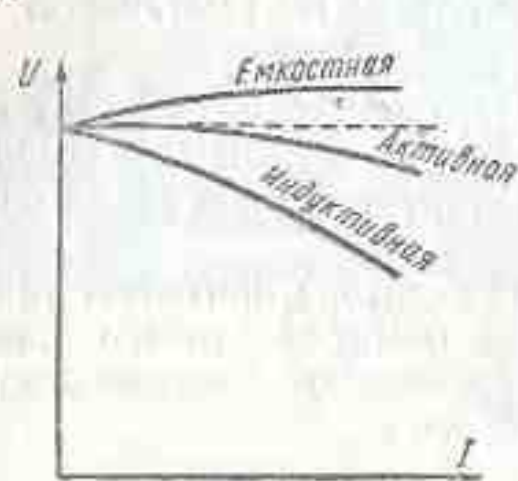


Рис. 128. Внешние характеристики синхронного генератора при различных характерах нагрузки

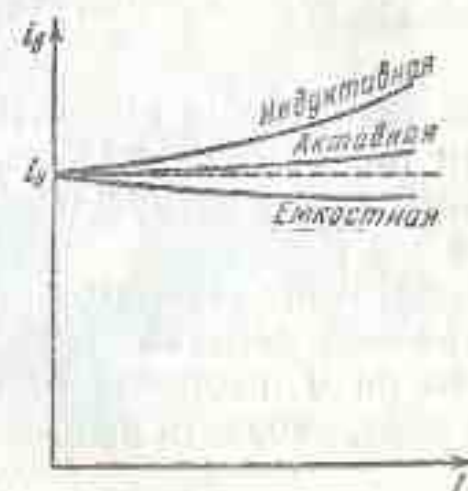


Рис. 129. Регулировочные характеристики синхронного генератора

Любой приемник электрической энергии требует постоянства напряжения сети. Чтобы обеспечить постоянное напряжение сети при изменении нагрузки в синхронном генераторе, изменяют и ток возбуждения.

Зависимость, показывающая, каким образом необходимо изменить ток в обмотке возбуждения для того, чтобы при изменении нагрузки генератора напряжение на его зажимах оставалось неизменным, называется *регулировочной характеристикой* (рис. 129). При активной нагрузке увеличение тока в статоре вызывает незначительное понижение напряжения, так как реакция якоря незначительно уменьшает магнитный поток. При этой нагрузке требуется незначительно увеличить ток возбуждения для обеспечения постоянства напряжения. При индуктивной нагрузке создается продольное размагничивающее поле реакции якоря, уменьшающее поток полюсов. Поэтому, чтобы создать постоянство напряжения (т. е. для постоянства результирующего магнитного потока), необходимо более значительно увеличить ток возбуждения для компенсации размагничивающего поля реакции якоря. При емкостной нагрузке происходит усиление магнитного поля и для постоянства напряжения необходимо уменьшить ток возбуждения при увеличении тока в статоре.

Наиболее часто синхронные генераторы работают на общую мощную сеть электростанции или энергосистемы. Напряжение та-

кой сети U_0 и частота тока в ней неизменны. Напряжение на зажимах генератора равно и противоположно напряжению сети $U_T = -U_0$.

Результирующее магнитное поле Φ_p статора, вращающееся с числом оборотов $n_1 = \frac{60f}{p}$ в пространстве, опережает напряжение U_T на 90° (рис. 130).

При неизменном напряжении сети U_0 амплитуда магнитного потока Φ_p результирующего магнитного поля статора также неизменна. При активной нагрузке генератора ток статора I совпадает по фазе с напряжением U_T . Поток реакции якоря Φ_n совпадает по фазе с током I , так что вектор тока в статоре I в другом масштабе определит вектор Φ_n . Результирующий магнитный поток создается действием потока полюсов Φ_m и потока реакции якоря Φ_n и может быть представлен геометрической суммой этих магнитных потоков.

Изменение тока возбуждения генератора не вызывает изменения его активной мощности, так как мощность, потребляемая им от первичного двигателя, остается неизменной (вращающий момент первичного двигателя и скорость вращения постоянны). Поэтому активная составляющая тока статора постоянна и конец вектора I (Φ_n) находится на прямой AB , параллельной горизонтальной оси. Если увеличить ток возбуждения, то увеличится поток полюсов Φ'_m , вектор которого находится между прямой AB и концом неизменного вектора Φ_p .

В этом случае изменится как по величине, так и по направлению вектор I' и Φ'_n , т. е. ток окажется отстающим по фазе от напряжения генератора.

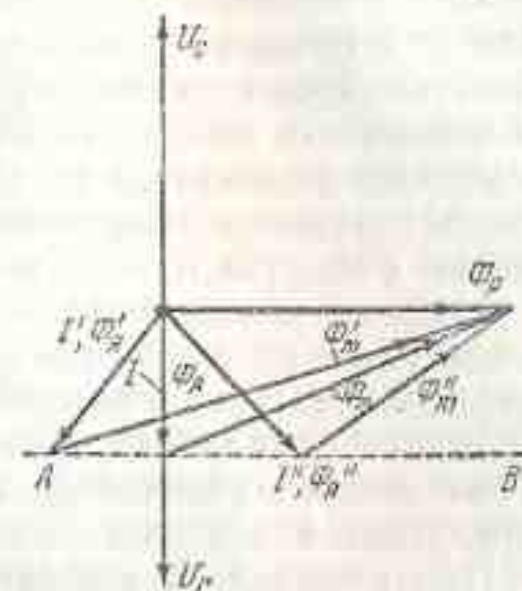


Рис. 130. Векторная диаграмма синхронного генератора при различных токах возбуждения

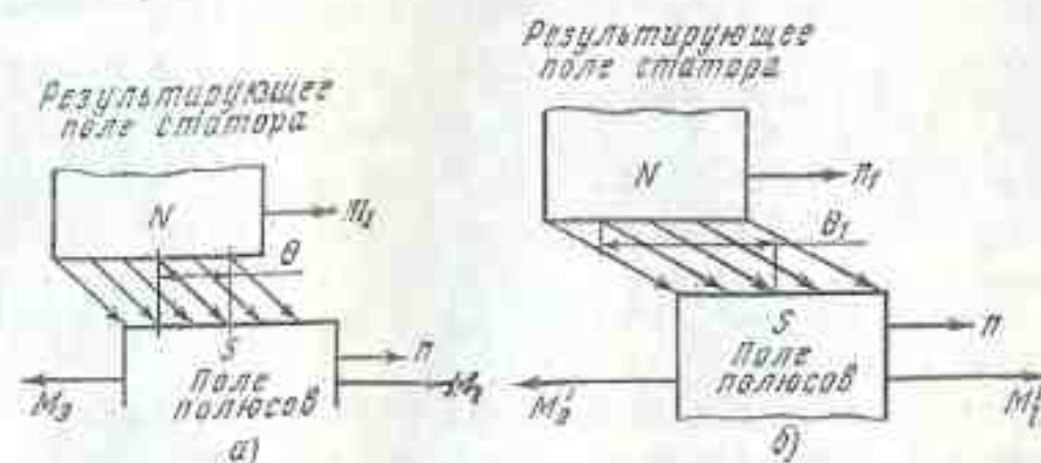


Рис. 131. Угол между осями магнитных полей ротора и статора при меньшем (а) и большем (б) моменте первичного двигателя

При уменьшении тока возбуждения уменьшится также и поток полюсов Φ''_m , что приведет к изменению тока в статоре I'' (Φ''_m) как по величине, так и по фазе. Таким образом, изменение тока возбуждения генератора, работающего на мощную сеть, вызывает изменение реактивной составляющей тока в статоре, т. е. изменяет реактивную мощность, вырабатываемую генератором.

Для изменения активной мощности необходимо изменить вращающий момент первичного двигателя, приводящего во вращение ротор синхронного генератора. Под действием вращающего момента первичного двигателя M_1 ротор машины с помещенными на нем полюсами приводится во вращение с числом оборотов в минуту n . Результирующее поле статора вращается в том же направлении с числом оборотов $n_1 = n$ (рис. 131, а). Следовательно, поле полюсов и результирующее поле статора вращаются синхронно, оставаясь неподвижными друг относительно друга, и между этими полями устанавливается взаимодействие. Магнитные линии, растягиваясь, стремятся приблизить поле ротора к полю статора, создавая электромагнитный тормозной момент M_2 , уравновешивающий момент первичного двигателя.

При равновесии момент $M_1 = M_2$, угол между осями магнитных полей Θ остается неизменным.

Если увеличить момент первичного двигателя M'_1 (рис. 131, б), то он окажется больше тормозного, и ротор, получив некоторое ускорение, начнет перемещаться относительно поля статора, вращающегося с постоянной скоростью $n_1 = \frac{60f}{p}$ (частота тока сети f постоянна). При этом угол между осями магнитных полей ротора и статора Θ , увеличится, и магнитные линии, растягиваясь в большей степени, увеличат тормозной электромагнитный момент M'_2 , так, что вновь восстановится равновесие моментов, т. е. $M'_1 = M'_2$.

Для включения генератора в сеть необходимо:

- 1) одинаковое чередование фаз в сети и генераторе;
- 2) равенство напряжения сети и э. д. с. генератора;
- 3) равенство частот э. д. с. генератора и тока сети;
- 4) включать генератор в тот момент, когда э. д. с. генератора в каждой фазе направлена встречно напряжению сети.

Невыполнение этих условий ведет к тому, что в момент включения генератора в сеть возникают токи, которые могут оказаться большими и опасными для генератора. При включении генераторов в сеть используют специальные устройства — синхроноскопы. Простейшим синхроноскопом являются три лампы накаливания, включаемые между зажимами генератора и сети. Лампы должны быть рассчитаны на двойное напряжение сети и до включения генератора будут одновременно загораться и погасать.

В момент, когда э. д. с. генератора равна и направлена встречно напряжению сети, лампы погаснут, так как напряжение на лампе равно нулю. При погасании ламп замыканием рубильника генератор включается в сеть.

До включения генератора в сеть э. д. с. его измеряется вольтметром и регулированием тока возбуждения устанавливается равной напряжению сети. Частота э. д. с. генератора регулируется изменением скорости вращения первичного двигателя.

§ 103. СИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Синхронный двигатель не имеет принципиальных конструктивных отличий от синхронного генератора. Так же как и в генераторе, на статоре синхронного двигателя помещается трехфазная обмотка, при включении которой в сеть трехфазного переменного тока будет создано вращающееся магнитное поле, число оборотов в минуту которого

$$n_1 = \frac{60f}{p}.$$

На роторе двигателя помещена обмотка возбуждения, включаемая в сеть источника постоянного тока. Ток возбуждения создает магнитный поток полюсов. Вращающееся магнитное поле, полученное токами обмотки статора, увлекает за собой полюса ротора. При этом ротор может вращаться только с синхронной скоростью, т. е. со скоростью, равной скорости вращения поля статора. Таким образом, скорость синхронного двигателя строго постоянна, если неизменна частота тока питающей сети.

Основным достоинством синхронных двигателей является возможность их работы с потреблением опережающего тока, т. е. двигатель может представлять собой емкостную нагрузку для сети. Такой двигатель повышает $\cos \phi$ всего предприятия, компенсируя реактивную мощность других приемников энергии.

Так же как и в генераторах, в синхронных двигателях изменение реактивной мощности, т. е. изменение $\cos \phi$, достигается регулированием тока возбуждения. При некотором токе возбуждения, соответствующем нормальному возбуждению, $\cos \phi = 1$. Уменьшение тока возбуждения вызывает появление отстающего (индуктивного) тока в статоре, а при увеличении тока возбуждения (перевозбужденный двигатель) — опережающего (емкостного) тока в статоре.

Достоинством синхронных двигателей является также меньшая, чем у асинхронных, чувствительность к изменению напряжения питающей сети. У синхронных двигателей вращающий момент пропорционален напряжению сети в первой степени, тогда как у асинхронных — квадрату напряжения.

Вращающий момент синхронного двигателя создается в результате взаимодействия магнитного поля статора с магнитным полем полюсов. От напряжения питающей сети зависит только магнитный поток поля статора.

Синхронные двигатели выполняют преимущественно с явно выраженными полюсами, и работают они в нормальном режиме при опережающем $\cos \phi = 0,8$. Возбуждение синхронные двигатели

получают либо от возбуждателя, либо от сети переменного тока через полупроводниковые выпрямители.

Пуск в ход синхронного двигателя непосредственным включением его в сеть невозможен, так как при включении обмотки статора в сеть создается вращающееся магнитное поле, а ротор в момент включения неподвижен, и следовательно, взаимодействия магнитных полей статора и ротора нет, т. е. двигатель не развивает вращающего момента. Поэтому для пуска в ход двигателя необходимо предварительно увеличить число оборотов ротора его до синхронной скорости или близкой к ней.

В настоящее время исключительное применение имеет так называемый асинхронный пуск синхронных двигателей, сущность которого заключается в следующем. В полюсных наконечниках ротора синхронного двигателя укладывается пусковая обмотка, выполненная в виде беличьего колеса, наподобие короткозамкнутой обмотки ротора асинхронной машины.

Обмотка статора двигателя включается в трехфазную сеть, и пуск его производится так же, как и пуск асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

После того как двигатель разовьет скорость, близкую к синхронной (примерно 95%), обмотка возбуждения включается в сеть постоянного тока и двигатель входит в синхронизм, т. е. скорость ротора увеличивается до синхронной.

При пуске в ход двигателя обмотка возбуждения замыкается на сопротивление, примерно в 10—12 раз большее сопротивления самой обмотки. Нельзя обмотку возбуждения при пуске в ход оставить разомкнутой или замкнуть накоротко. Если при пуске в ход обмотка возбуждения окажется разомкнутой, то в ней будет индуцироваться очень большая э. д. с., опасная как для изоляции обмотки, так и для обслуживающего персонала. Создание э. д. с. большой величины объясняется тем, что при пуске в ход поле статора вращается с большой скоростью относительно неподвижного ротора и с большой скоростью пересекает проводники обмотки возбуждения, имеющей большое число витков.

Если обмотку возбуждения замкнуть накоротко при пуске в ход, то двигатель при пуске под нагрузкой может развить скорость, близкую к половине синхронной, и войти в синхронизм не сможет.

Работа синхронной машины с потреблением из сети опережающего тока дает возможность использовать ее в качестве компенсатора. Как выше было отмечено, синхронный двигатель для сети может являться конденсатором и повышать $\cos \phi$ всей энергоустановки, компенсируя реактивную мощность других приемников энергии.

Повышение $\cos \phi$ снижает потребление реактивной мощности электроустановок предприятия и уменьшает стоимость электроэнергии.

Компенсатором является синхронный двигатель, работающий без нагрузки и предназначенный для повышения $\cos \phi$ предприя-

тия. Таким образом, компенсатор является генератором реактивной мощности.

Конструктивно компенсатор отличается от синхронного двигателя незначительно. Компенсатор не несет механической нагрузки, поэтому его вал и ротор легче, а воздушный зазор меньше, чем у двигателя.

Основным недостатком синхронных двигателей является потребность в источнике как переменного, так и постоянного тока.

Потребность в источнике постоянного тока для питания обмотки возбуждения синхронного двигателя делает его крайне неэкономичным при небольших мощностях. Поэтому при малых мощностях синхронные двигатели с возбуждением постоянным током не находят применения.

При малых мощностях в случае необходимости получения постоянства скорости вращения (в устройствах автоматики, телемеханики, звукового кино и т. п.) широко используют реактивные синхронные двигатели.

Ротор реактивного синхронного двигателя имеет явно выраженные полюса. При очень малых мощностях ротор делают цилиндрическим из алюминия, в который при отливке закладываются стержни из мягкой стали, выполняющие функцию явно выраженных полюсов (рис. 132). Цилиндрическая форма ротора упрощает его обработку и балансировку, а также снижает потери на трение о воздух при работе машины, что существенно для двигателей очень малых мощностей.

В реактивных синхронных двигателях вращающий момент создается в результате стремления ротора ориентироваться в магнитном поле таким образом, чтобы магнитное сопротивление для этого поля было наименьшим. Поэтому ротор будет всегда занимать такое положение в пространстве, при котором магнитные линии вращающегося магнитного поля статора замкнутся через сталь ротора, так что он будет вращаться вместе с магнитным полем статора.

Наряду с трехфазным широко используют и однофазные реактивные двигатели.

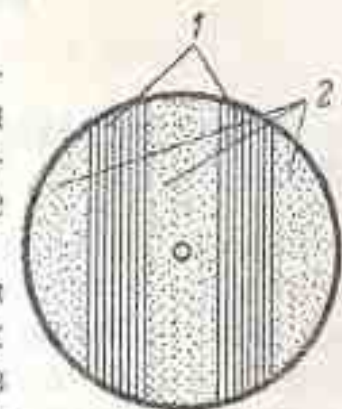


Рис. 132. Устройство ротора реактивного синхронного двигателя:
1 — мягкая сталь,
2 — алюминий

Контрольные вопросы

1. Поясните принцип работы синхронного генератора.
2. Каково устройство генератора с явно и неявно выраженными полюсами?
3. Объясните внешние и регулировочные характеристики синхронного генератора.
4. Какие условия необходимо выполнить для включения синхронного генератора в сеть?
5. Объясните принцип работы синхронного двигателя.
6. В чем состоит принцип работы реактивного двигателя?

ГЛАВА X

МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 104. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Простейшим генератором является виток, вращающийся в магнитном поле полюсов N и S (см. рис. 125). В таком витке индуцируется переменная во времени э.д.с. Поэтому при соединении концов витка с контактными кольцами, вращающимися вместе с витком, в нагрузке через неподвижные щетки протекает переменный ток, т. е. такая машина является генератором переменного тока.

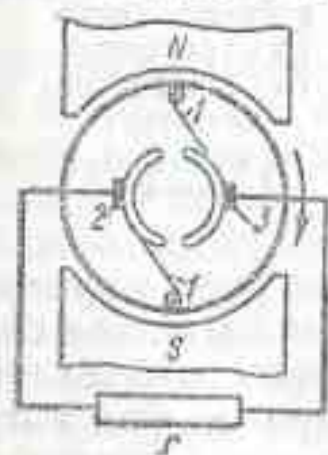


Рис. 133. Устройство генератора постоянного тока

Для преобразования переменного тока в постоянный применяют коллектор, принцип действия которого состоит в следующем. Концы витка I (рис. 133) присоединяются к двум медным полукольцам (сегментам), называемым коллекторными пластинами. Пластины жестко укрепляют на валу машины и изолируют как друг от друга, так и от вала. На пластинах помещают неподвижные щетки 2 и 3, электрически соединенные с приемником энергии.

При вращении витка коллекторные пластины также вращаются вместе с валом машины и каждая из неподвижных щеток 2 и 3 соприкасается то с одной, то с другой пластиной. Щетки на коллекторе устанавливают так, чтобы они переходили с одной пластины на другую в тот момент, когда э.д.с., индуцируемая в витке, была равна нулю. В этом случае при вращении якоря в витке индуцируется переменная э.д.с., изменяющаяся синусоидально при равномерном распределении магнитного поля, но каждая из щеток соприкасается с той коллекторной пластиной и соответственно с тем из проводников, который в данный момент находится под полюсом определенной полярности.

Следовательно, э.д.с. на щетках 2 и 3 знака не меняет, и ток по внешнему участку замкнутой электрической цепи протекает в одном направлении от щетки 2 через сопротивление r к щетке 3.

Однако несмотря на то, что направление э.д.с. во внешней цепи остается неизменным, величина ее меняется во времени, т. е. получена не постоянная, а пульсирующая э.д.с. Ток во внешней цепи будет также пульсирующим.

Если поместить на якоре два витка под углом 90° один к другому и концы этих витков соединить с четырьмя коллекторными пластинами, то пульсация э.д.с. и тока во внешней цепи значительно уменьшится. При увеличении числа коллекторных пластин пульсация быстро уменьшается и при 16 пластинах на пару полюсов становится менее 1%. Таким образом, при большом числе коллекторных пластин э.д.с. и ток практически постоянны.

§ 105. УСТРОЙСТВО ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Неподвижная часть в машинах постоянного тока является индуктирующей, т. е. создающей магнитное поле, а вращающаяся часть является индуктируемой (якорем).

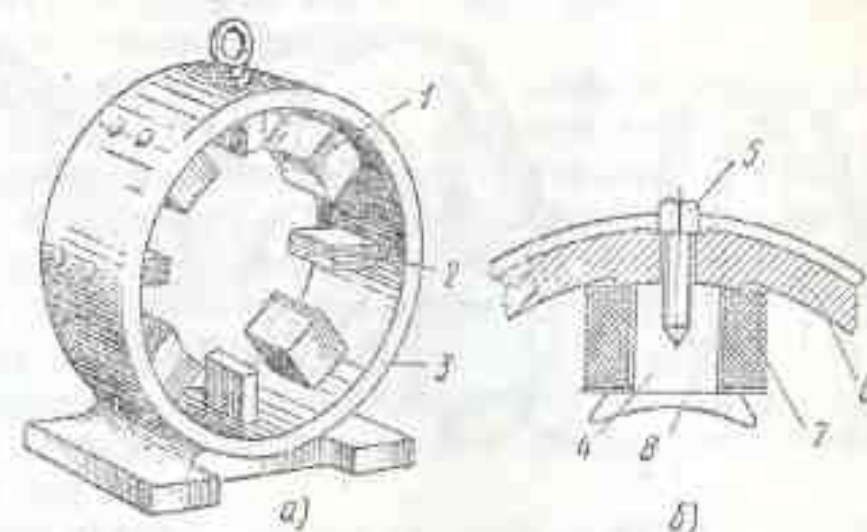


Рис. 134. Устройство статора машины постоянного тока:
а — схема статора, б — схема главных полюсов

Неподвижная часть машины (рис. 134, а) состоит из главных полюсов 1, дополнительных полюсов 2 и станины 3. Главный полюс (рис. 134, б) представляет собой электромагнит, создающий магнитный поток. Он состоит из сердечника 4, обмотки возбуждения 7 и полюсного наконечника 8. Полюсы крепятся на станине 6 с помощью болта 5. Сердечник полюса отливается из стали и имеет поперечное сечение овальной формы. На сердечнике полюса помещена катушка обмотки возбуждения, намотанная из изолированного медного провода. Катушки всех полюсов соединяются последовательно, образуя обмотку возбуждения. Ток, протекающий по обмотке возбуждения, создает магнитный поток. Полюсный наконечник удерживает обмотку возбуждения на полюсе и обеспечивает равномерное распределение магнитного поля под полюсом. Полюсному наконечнику придают такую форму, при которой воздушный зазор между полюсами и якорем одинаков по всей длине

полюсной дуги. Добавочные полюсы имеют также сердечник и обмотку.

Добавочные полюсы устанавливают в средних точках между главными полюсами, и число их может быть либо равным числу главных полюсов, либо вдвое меньшим. Добавочные полюсы устанавливают в машинах больших мощностей, и они служат для устранения искрения под щетками. В машинах малых мощностей добавочных полюсов обычно нет.

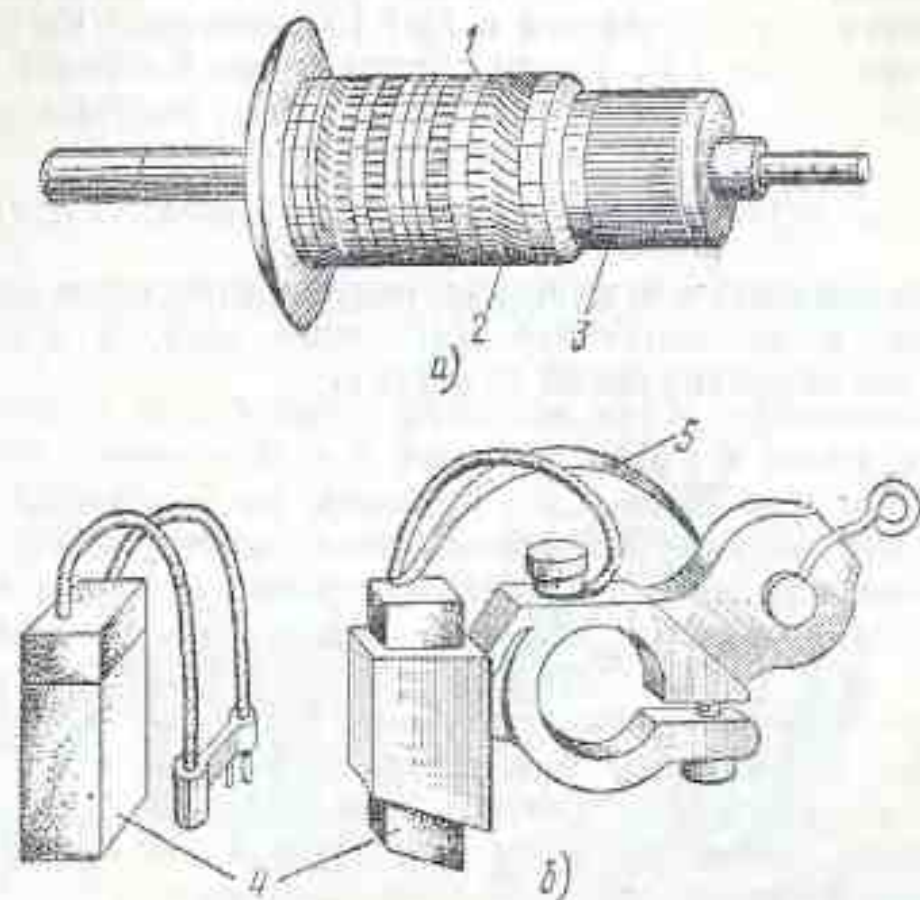


Рис. 135. Якорь машины постоянного тока:
а — общий вид, б — щетка и щеткодержатель.

Станина отливается из стали и является остовом машины. На станине крепят главные и добавочные полюсы, а также на торцовых сторонах боковые щиты с подшипниками, удерживающими вал машины. С помощью станины машина крепится на фундаменте.

Вращающаяся часть машины (якорь) (рис. 135, а) состоит из сердечника 1, обмотки 2 и коллектора 3. Сердечник якоря представляет собой цилиндр, собранный из листов электротехнической стали. Листы изолируются друг от друга лаком или бумагой для уменьшения потерь на вихревые токи. Стальные листы штампуют на станках по шаблону; они имеют пазы, в которых укладываются проводники обмотки якоря. В теле якоря делают воздушные каналы для охлаждения обмотки и сердечника якоря.

Обмотку якоря выполняют из медного изолированного провода или из медных стержней прямоугольного поперечного сечения. Она состоит из секций, изготовленных на специальных шаблонах и укладываемых в пазы сердечника якоря. Одновитковая секция состоит из двух активных проводов, соединенных между собой.

Секции могут иметь не один, а много витков. Такие секции называются многовитковыми. Обмотка тщательно изолируется от сердечника и закрепляется в пазах деревянными клиньями. Лобовые соединения укрепляются стальными бандажами. Все секции обмотки, помещенные на якоре, соединяются между собой последовательно, образуя замкнутую цепь. Провода, соединяющие две секции, следующие одна за другой по схеме обмотки, присоединяются к коллекторным пластинам.

Коллектор представляет собой цилиндр, состоящий из отдельных пластин. Коллекторные пластины изготовляют из твердотянутой меди и изолируют между собой и от корпуса прокладками из миканита. Для крепления на втулке коллекторным пластинам придают форму «ласточка хвоста», который зажимается между выступом на втулке и шайбой, имеющими форму, соответствующую форме пластины. Шайба крепится к втулке болтами.

Коллектор является наиболее сложной в конструктивном отношении и наиболее ответственной в работе частью машины. Поверхность коллектора должна быть строго цилиндрической во избежание биения и искрения щеток.

Для соединения обмотки якоря с внешней цепью на коллекторе помещают неподвижные щетки, которые могут быть графитными, угольно-графитными или бронзо-графитными. В машинах высокого напряжения применяют графитные щетки, имеющие большое переходное сопротивление между щеткой и коллектором, в машинах низкого напряжения — бронзо-графитные щетки. Щетки помещают в особых щеткодержателях (рис. 135, б). Щетка 4, помещенная в обойме щеткодержателя, прижимается пружиной 5 к коллектору. На каждом щеткодержателе может находиться несколько щеток, включенных параллельно.

Щеткодержатели укрепляются на щеточных болтах-пальцах, которые, в свою очередь, закреплены на траверсе. Для укрепления на щеточном пальце щеткодержатель имеет отверстие.

Щеточные пальцы изолируются от траверсы изоляционными шайбами и втулками. Число щеткодержателей обычно равно числу полюсов.

Траверса устанавливается на подшипниковом щите в машинах малой и средней мощности или прикрепляется к станине в машинах больших мощностей. Траверсу можно поворачивать и этим изменять положение щеток относительно полюсов.

Обычно траверса устанавливается в таком положении, при котором расположение щеток в пространстве совпадает с расположением средних точек главных полюсов.

§ 106. ОБМОТКИ ЯКОРЕЙ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Обмотки якорей машин постоянного тока изготовляют из изолированных медных проводов, а в машинах больших мощностей — из шин прямоугольного поперечного сечения; обмотки выполняются замкнутыми. При изготовлении обмотки из шин прямоугольного поперечного сечения их делают стержневыми и каждая секция

может состоять из двух активных проводов (одновитковая секция).

Из изолированного медного провода секции обмоток изготавливают в виде катушек с определенным числом витков (многовитковые секции).

В машинах постоянного тока исключительное применение находят шаблонные двухслойные обмотки, у которых в пазах якоря активные части секций размещаются в два слоя.

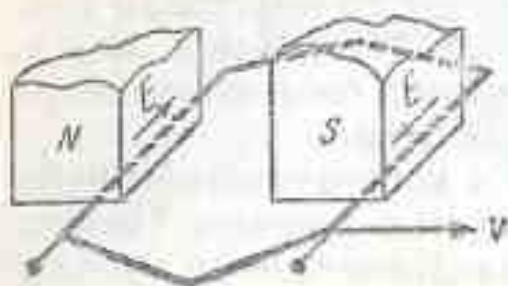


Рис. 136. Направление э. д. с. в активных сторонах секции обмотки, отстоящих на расстоянии полюсного деления

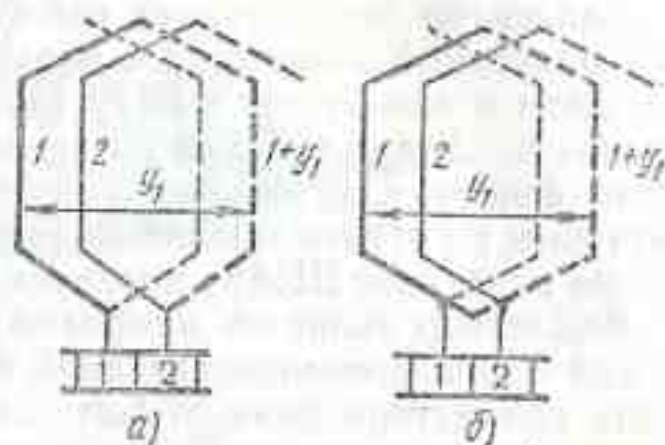


Рис. 137. Секция простой параллельной обмотки:
а — одновитковая, б — многовитковая

Каждая секция обмотки состоит из двух активных сторон, отстоящих друг от друга на расстоянии, близком к полюсному делению τ , т. е. расстоянию между средними точками соседних разноименных полюсов. При таком расстоянии между активными проводниками (шаге обмотки) э. д. с., индуцированные в этих проводниках, будут направлены в одну сторону, и э. д. с. секции будет иметь наибольшее значение, так как э. д. с. ее активных сторон складываются (рис. 136). Одна активная часть секции находится в верхнем слое пазов, другая — в нижнем. При изображении развернутых схем обмоток активные стороны, лежащие в верхнем слое пазов, изображаются сплошной линией, а стороны нижнего слоя — прерывистой. Концы секции соединяются как с другими секциями обмотки, так и с коллекторными пластинами.

Секции, образующие обмотку, соединяются между собой так, чтобы индуцированные в них э. д. с. были направлены согласно, т. е. в одну сторону. Для этого начальные (конечные) проводники последовательно соединенных секций должны находиться в любой момент под полюсами одинаковой полярности.

В зависимости от порядка соединения секций друг с другом обмотки могут быть параллельными (петлевыми) и последовательными (волновыми).

На рис. 137 показана (толстой линией) одновитковая и многовитковая секция параллельной обмотки, состоящая из активной части верхнего слоя пазов 1 и нижнего слоя пазов $1+y_1$. В этих обмотках последовательно соединяются между собой секции начальные (конечные), активные стороны которых находятся под од-

ним полюсом в расположенных рядом пазах. Таким образом, концы секций параллельной обмотки присоединяются к двум соседним коллекторным пластинам (1 и 2), причем в многовитковых секциях к пластине 1 подключается начало первого витка, а к пластине 2 — конец последнего витка, соединяемый с началом следующей секции. Любая коллекторная пластина (например, 1) соединяется

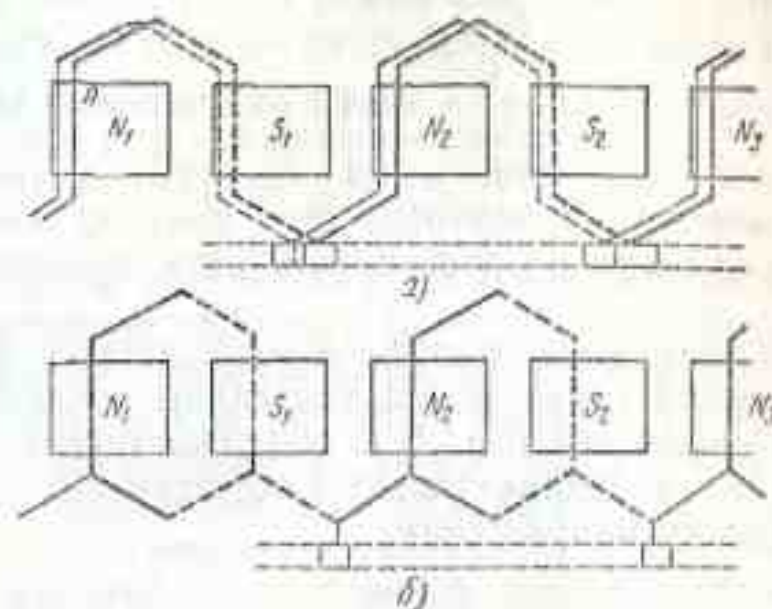


Рис. 138. Развернутая схема двух секций простой последовательной обмотки:
а — одновитковой, б — многовитковой

с двумя активными проводами, в каждом из которых протекает ток одной параллельной ветви обмотки i_a , так что между двумя щетками различной полярности обмотка образует две параллельные ветви.

При параллельных обмотках число щеток должно быть всегда равно числу полюсов $2p$ и, следовательно, число параллельных ветвей $2a$ в этих обмотках равно числу полюсов, т. е. $2a=2p$ ($a=p$).

При большом числе полюсов параллельная обмотка образует много параллельных ветвей, что дает возможность понизить ток в одной ветви и уменьшает поперечное сечение провода обмотки.

В последовательных обмотках начальные (конечные) активные провода секций находятся под различными полюсами одинаковой полярности (рис. 138).

При обходе схемы обмотки с верхнего проводника n мы получим первую секцию, активные стороны которой находятся под полюсами N_1 и S_1 (секция на схеме изображена толстой линией). Активные стороны второй секции, последовательно соединенной с первой, находятся под полюсами N_2 — S_2 , третьей секции — под полюсами N_3 и S_3 и т. д. После полного обхода окружности якоря приходим в верхний проводник пары $n-1$, лежащей рядом (лучше слева) с проводником пары n , от которого начали обход обмотки. Последовательно с верхним проводником пары $n-1$ включаем проводники, лежащие под полюсами S_1 , N_2 , S_2 и т. д., пока вновь

не обойдем окружность якоря и не приходим к проводнику, лежащему рядом с проводником $n - 1$. После этого совершается новый обход проводников по схеме обмотки и т. д., пока все проводники не окажутся включенными в замкнутую цепь.

Вне зависимости от числа полюсов простая последовательная обмотка образует две параллельные ветви, т. е. $2a = 2$. Поэтому при любом числе полюсов машина может иметь только две щетки, если обмотка якоря последовательная, причем эти щетки должны помещаться на расстоянии $\frac{1}{2p}$ части окружности коллектора. Например, при $p = 2$ расстояние между щетками должно быть равно четверти окружности коллектора. Это дает возможность делать доступной для осмотра не всю окружность коллектора, а только ее часть.

Наличие только двух параллельных ветвей свидетельствует о том, что в каждой ветви последовательно соединяется большое число активных проводов и э. д. с. машины может иметь большое значение. Поэтому последовательные обмотки находят применение для машин высокого напряжения.

§ 107. Э. Д. С. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Как известно, в проводнике, перемещающемся в магнитном поле в направлении, перпендикулярном направлению магнитных линий этого поля, создается э. д. с., равная

$$e = Blv,$$

где B — среднее значение магнитной индукции, тл,

l — длина проводника, м,

v — скорость перемещения проводника, м/сек.

На якоре машины укладывается большое число активных проводов, которое обозначим буквой N . В каждой параллельной ветви обмотки будет последовательно включено $\frac{N}{2a}$ активных проводов. Таким образом, э. д. с. машины

$$E = \frac{N}{2a} e = \frac{N}{2a} Blv.$$

Скорость перемещения проводников в магнитном поле

$$v = 2p\tau \frac{n}{60}, \quad (128)$$

где $2p$ — число полюсов машины,

τ — полюсное деление, т. е. расстояние между центрами разноименных полюсов,

n — число оборотов якоря машины в минуту.

Имея в виду, что произведение среднего значения магнитной индукции B на осевую длину полюса l и на полюсное деление τ

представляет собой магнитный поток одного полюса $\Phi (Bl\tau = \Phi)$, получим для э. д. с. машины следующее выражение:

$$E = \frac{pN}{60a} n\Phi. \quad (129)$$

Для каждой машины величины p , N и a постоянны, так что отношение $\frac{pN}{60a} = C$ представляет собой величину, постоянную для данной машины. Следовательно, э. д. с. машины постоянного тока определяется следующим выражением:

$$E = Cn\Phi, \quad (130)$$

т. е. э. д. с. машины постоянного тока равна произведению постоянной конструктивной величины C на число оборотов якоря в минуту n и магнитный поток полюсов Φ . Это выражение показывает, что для изменения э. д. с. (или напряжения) машины необходимо изменить либо число оборотов якоря, либо магнитный поток полюсов. Так как изменение скорости вращения двигателя, приводящего в движение генератор, связано со значительными сложностями, то на практике регулировку э. д. с. и напряжения производят изменением магнитного потока, который зависит от тока в обмотке возбуждения. В цепь обмотки возбуждения включают реостат, с изменением сопротивления которого изменяется и ток возбуждения.

§ 108. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ НАГРУЗКЕ

При холостом ходе машины тока в якоре нет и магнитное поле создается намагничивающей силой полюсов. Это магнитное поле симметрично относительно оси полюсов и распределяется равномерно в воздушном зазоре (рис. 139, а). Положим, что щетки

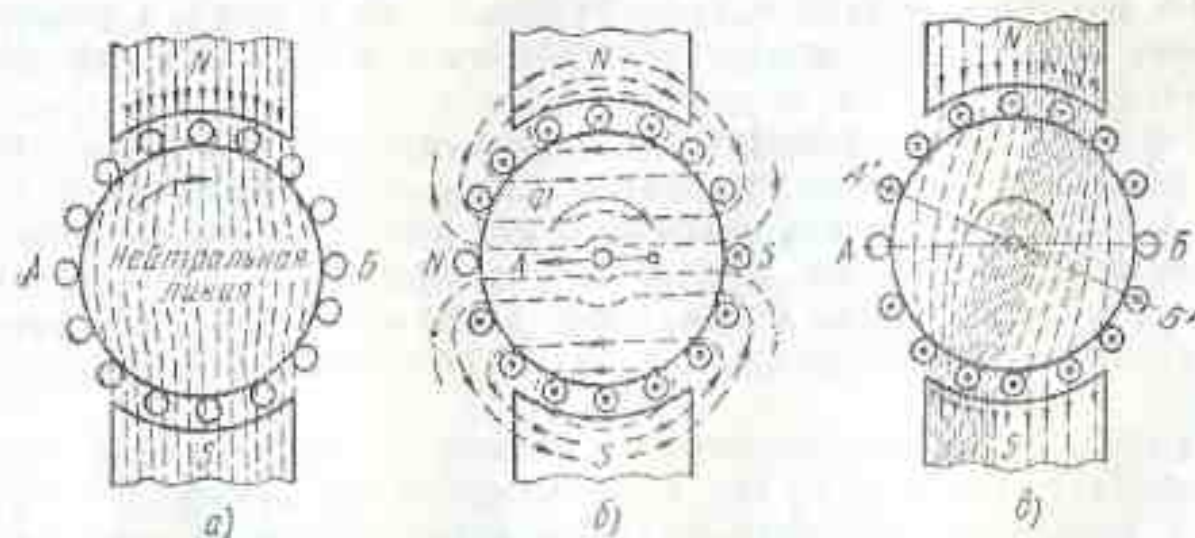


Рис. 139. Магнитное поле машины постоянного тока:
а — магнитное поле полюсов, б — магнитное поле якоря, в — результирующее магнитное поле при нагрузке

установлены на геометрической нейтральной, т. е. на линии, проходящей через центр якоря и перпендикулярной оси полюсов.

При нагрузке машины в обмотке якоря протекает ток, который создает свое магнитное поле. Поле якоря, действуя на магнитное поле полюсов, изменяет и искажает его. При нагрузке машины по магнитной цепи замкнется результирующий магнитный поток Φ_r , создаваемый совместным действием намагничивающих сил полюсов и якоря.

Результирующий магнитный поток Φ_r не равен потоку полюсов Φ_m , созданному намагничивающими силами обмотки возбуждения при холостом ходе. Воздействие поля, созданного током в якоре при нагрузке машины, на магнитное поле полюсов называется *реакцией якоря*.

Если по проводникам обмотки якоря невозбужденной машины пропустить от постороннего источника такой ток, который имел бы место при нагрузке машины, то будет создано магнитное поле якоря (рис. 139, б). Это поле якоря замкнется поперек оси полюсов и называется *поперечным полем реакции якоря*.

Намагничивающая сила якоря под одним краем полюса (под набегавшим для генератора и под сбегающим для двигателя) направлена встречно намагничивающей силе полюсов, а под другим краем полюса (под сбегающим для генератора и под набегавшим для двигателя) согласно намагничивающей силе полюсов. Следовательно, под одним краем полюса происходит уменьшение, а под другим — увеличение магнитной индукции.

Таким образом, при нагрузке машины результирующее магнитное поле будет несимметрично относительно оси полюсов (рис. 139, в), т. е. поперечное поле реакции якоря перераспределяет магнитное поле полюсов, ослабляя его под одним краем и усиливая под другим. Поле реакции якоря также смещает физическую нейтраль, т. е. линию, проходящую через центр якоря и перпендикулярную оси результирующего магнитного поля.

Если магнитная система машины не насыщена, то увеличение магнитного потока под одним краем полюса будет равно уменьшению магнитного потока под другим краем полюса и результирующий магнитный поток останется неизменным при изменении нагрузки.

Так как машины работают при сравнительно сильных магнитных полях, то за счет насыщения стали увеличение магнитного потока под одним краем полюса будет меньше, чем уменьшение магнитного потока под другим краем полюса. Поэтому результирующий магнитный поток при нагрузке окажется меньше магнитного потока полюсов, т. е. магнитного потока при холостом ходе.

Изменение магнитного потока машины приводит в генераторах к изменению как э. д. с., так и напряжения на зажимах машины. Кроме того, под действием реакции якоря увеличивается напряжение между смежными коллекторными пластинами, что ухудшает коммутацию тока.

Если, например, в генераторе при неизменном токе возбуждения увеличится нагрузка (увеличится ток в якоре), то за счет размагничивающего действия поля реакции якоря магнитный поток машины уменьшится, что повлечет за собой уменьшение как э. д. с., так и напряжения на зажимах генератора.

Поэтому в тех случаях, когда требуется постоянство э. д. с. или напряжения на зажимах генератора, при увеличении нагрузки машины увеличивают и ток возбуждения с тем, чтобы увеличение магнитного потока полюсов компенсировало размагничивающее действие реакции якоря. Кроме того, при нагрузке напряжение уменьшается вследствие падения напряжения в якоре.

§ 109. КОММУТАЦИЯ ТОКА

Коммутацией тока называется процесс снятия тока с коллектора, связанный с переключением секций из одной параллельной ветви в другую. Ток в коммутируемой секции изменяет направление.

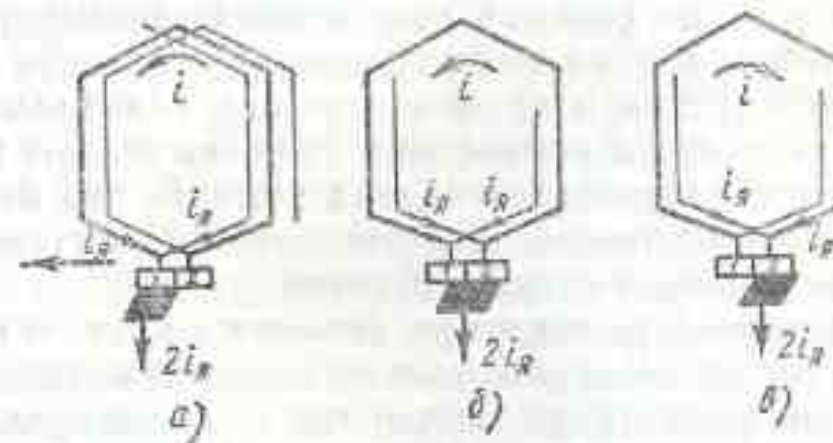


Рис. 140. Коммутируемая секция обмотки: а — до начала коммутации, б — при коммутации, в — по окончании коммутации

При вращении якоря машины коллекторные пластины поочередно приходят в соприкосновение со щетками, так что в определенные промежутки времени секция или несколько секций замыкаются щеткой. Поскольку переходное сопротивление между щеткой и коллекторной пластиной сравнительно мало, то замыкание секций щеткой близко к их короткому замыканию.

На рис. 140, а показана секция простой параллельной обмотки. В этой секции протекает ток одной параллельной ветви:

$$i_n = \frac{i_a}{2a}, \quad (131)$$

где i_n — ток нагрузки,

$2a$ — число параллельных ветвей обмотки.

При вращении якоря его обмотка и коллектор перемещаются относительно неподвижной щетки справа налево. В некоторый мо-

мент, соответствующий началу коммутации, щетка соприкасается с коллекторной пластиной 1, соединенной с двумя проводами обмотки, в каждом из которых протекает ток одной параллельной ветви i_n .

Таким образом, через коллекторную пластину и щетку протекает ток, равный сумме токов двух параллельных ветвей $2i_n$. В выделенной нами секции ток равен току одной параллельной ветви и в данный момент направлен против часовой стрелки.

В дальнейшем при вращении якоря щетка будет соприкасаться с коллекторными пластинами 1 и 2, замыкая выделенную нами секцию (рис. 140, б). В определенный момент щетка полностью перейдет на коллекторную пластину 2, и ток в выделенной нами секции изменит направление на обратное (рис. 140, в), т. е. секция переключается из одной параллельной ветви в другую. Время переключения секции, называемое *периодом коммутации*, мало и за это время в секции происходит изменение тока от $+i_n$ до $-i_n$.

При изменении тока в секции создается э. д. с. самоиндукции, которая может достигать сравнительно больших значений.

Кроме того, поскольку процесс коммутации происходит одновременно в нескольких секциях под всеми щетками, то в каждой секции создаются э. д. с. взаимной индукции.

Э. д. с. самоиндукции и взаимной индукции, называемые реактивными э. д. с., препятствуя изменениям тока, вызывают неравномерное распределение плотности тока под щеткой, что является причиной образования искрения, которое особенно интенсивно в момент размыкания щеткой секции обмотки.

Чрезмерная плотность тока при наличии разности потенциалов между щеткой и коллектором вызывает возникновение дугового разряда, который ионизирует тончайшие слои воздуха, находящегося между щеткой и коллектором, и способствует развитию дуги. Дуга может перейти к щетке другой полярности, образовав круговую огонь на коллекторе, и это приведет к повреждению последнего.

Искрение щеток может быть также вызвано рядом других причин, как-то: неровностью поверхности коллектора, биением щеток, загрязненностью поверхности коллектора, наличием влаги на ней и т. д.

Даже незначительное искрение щеток является нежелательным, так как увеличивается износ щеток и коллектора и повышается нагрев последнего за счет увеличения переходного сопротивления между щеткой и коллектором.

Наиболее эффективным способом улучшения коммутации является компенсация реактивных э. д. с. Для этого в зоне коммутации, в которой находятся активные стороны коммутируемых секций, необходимо создать такое внешнее магнитное поле, при котором индуцируемая в секциях э. д. с. вращения e_v будет равна и противоположна реактивной э. д. с. e_r , т. е. $e_v = -e_r$. Для создания такого внешнего магнитного поля устанавливают дополнительные полюсы N_k и S_k , размещая их между главными полюсами.

На рис. 141 показана схема генератора, якорь которого вращается каким-либо двигателем в направлении, показанном стрелкой. В обмотке якоря индуцируется э. д. с., и при нагрузке протекает ток. Направление э. д. с. и тока в проводниках обмотки показано на схеме, на которой выделены проводники 1 и 2 коммутируемой секции. Реактивная э. д. с. e_r , препятствуя изменениям тока в коммутируемой секции, будет направлена в проводниках 1 и 2 встречно изменениям тока, как показано на схеме. Для компенсации реактивной э. д. с. в проводниках 1 и 2 нужно создать э. д. с. вращения $e_v = -e_r$, для чего и установлены дополнительные полюсы N_k и S_k .

Таким образом, полярность дополнительного полюса в генераторе должна соответствовать полярности следующего за ним в направлении вращения якоря главного полюса. В двигателе полярность дополнительного полюса должна соответствовать полярности предыдущего по направлению вращения якоря главного полюса.

Обмотку возбуждения дополнительных полюсов соединяют последовательно с обмоткой якоря для того, чтобы реактивная э. д. с. была компенсирована при любой нагрузке машины. Для этой же цели магнитная цепь дополнительных полюсов ненасыщена, т. е. между сердечником якоря и дополнительным полюсом создан сравнительно большой воздушный промежуток. Так как реактивная э. д. с. пропорциональна току в якоре, то она компенсируется при любой нагрузке машины в том случае, если э. д. с. вращения также пропорциональна току нагрузки. Поэтому магнитное поле в зоне коммутации должно изменяться пропорционально току якоря.

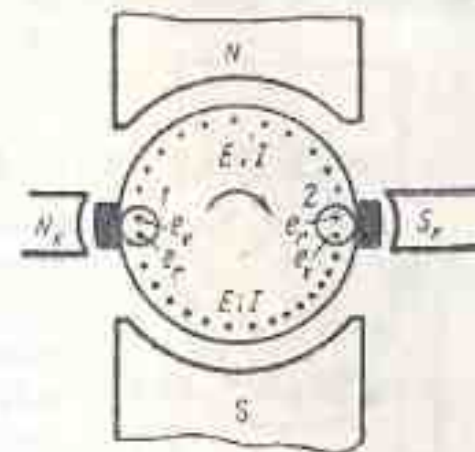


Рис. 141. Полярность дополнительных полюсов в генераторах постоянного тока

§ 110. РАБОТА МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАТОРА

Якорь генератора приводится во вращение каким-либо двигателем, развивающим вращающий момент M_1 . При перемещении проводников обмотки якоря в магнитном поле полюсов в них индуцируется э. д. с., направление которой определяется правилом правой руки (рис. 142). Если якорь вращается с числом оборотов в минуту n , то в его обмотке индуцируется э. д. с.

$$E = Cn\Phi, \quad (132)$$

Если обмотку якоря через щетки замкнуть на какой-либо приемник энергии r (сопротивление нагрузки), то через этот приемник и обмотку якоря будет протекать ток I_a , который в обмотке якоря имеет направление, совпадающее с направлением э. д. с. В резуль-

тате взаимодействия этого тока с магнитным полем полюсов создается электромагнитный момент M_0 , направление которого определяется правилом левой руки.

Таким образом, развиваемый машиной электромагнитный момент является тормозным, направленным встречно направлению вращения якоря машины, так что для вращения последнего первичный двигатель должен развивать вращающий момент M_1 , достаточный для преодоления электромагнитного тормозного момента, следовательно, машина потребляет механическую энергию.

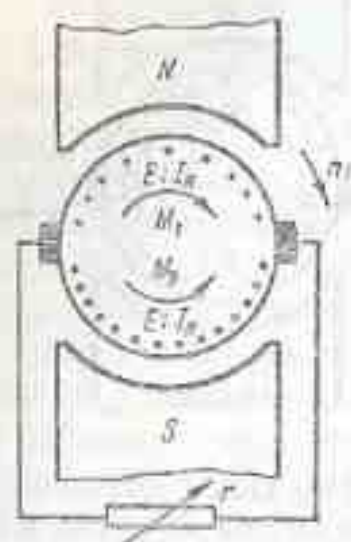


Рис. 142. Схема работы генератора постоянного тока

В случае равновесия моментов, т. е. $M_1 = M_0$, якорь машины вращается с неизменной скоростью. При нарушении равновесия моментов число оборотов якоря начнет изменяться. Если почему-либо момент первичного двигателя уменьшится, т. е. станет меньше электромагнитного момента генератора ($M_1 < M_0$), то число оборотов якоря машины начнет уменьшаться. При этом будет уменьшаться как э. д. с., так и ток в обмотке якоря, что вызывает уменьшение тормозного электромагнитного момента генератора. В случае увеличения момента первичного двигателя ($M_1 > M_0$) число оборотов якоря, а также э. д. с. и ток в его обмотке будут увеличиваться, что вызывает увеличение тормозного электромагнитного момента.

При нарушении равновесия моментов число оборотов якоря, э. д. с. и ток в его обмотке претерпевают изменения до восстановления равновесия моментов, т. е. пока электромагнитный момент генератора не станет равным вращающему моменту первичного двигателя.

Таким образом, любое изменение момента первичного двигателя, т. е. потребляемой генератором мощности, вызывает соответствующее изменение как электромагнитного момента генератора, так и вырабатываемой им мощности. Так же при изменениях нагрузки генератора потребуется соответствующее изменение момента первичного двигателя для поддержания постоянства числа оборотов якоря генератора.

Ток обмотки якоря I_a , протекающий при нагрузке генератора, встречает на своем пути сопротивление внешней нагрузки r_n , сопротивление обмотки якоря $r_{об}$ и сопротивление переходных контактов между щетками и коллектором $r_{щ}$. Обозначив через r_a внутреннее сопротивление машины, представляющее собой сумму сопротивлений обмотки якоря и щеточных контактов ($r_{об} + r_{щ}$), для тока в якоре можем записать следующее выражение:

$$I_a = \frac{E}{r_n + r_a} \quad (133)$$

Сопротивление $r_{щ}$ непостоянно и зависит от большого числа факторов, как-то: величины и направления тока, состояния коллек-

тора, силы нажатия щеток на коллектор, скорости вращения. Падение напряжения в щеточных контактах остается примерно неизменным при изменениях нагрузки (принимается равным 2 в на пару угольных и графитных щеток).

Поэтому внутреннее сопротивление машины r_a также не является величиной постоянной при изменении нагрузки генератора.

Так как $I_a r_n = U$, где U — напряжение на зажимах генератора при нагрузке, то получим следующее уравнение равновесия э. д. с. для генератора:

$$U = E - I_a r_n \quad (134)$$

Из уравнения равновесия э. д. с. легко получить уравнение мощностей, т. е.

$$U I_a = E I_a - I_a^2 r_n \quad (135)$$

или

$$P_2 = P_3 - P_{об}$$

где P_2 — полезная мощность генератора, отдаваемая потребителю электрической энергии,

P_3 — внутренняя или электромагнитная мощность генератора, преобразованная им в электрическую,

$P_{об}$ — потери мощности в обмотке якоря и щеточных контактах.

При холостом ходе генератора электромагнитная мощность равна нулю ($P_3 = 0$), но для вращения якоря машины первичный двигатель должен затратить некоторую мощность P_0 , расходуемую на покрытие потерь холостого хода. Мощность P_0 складывается из потерь механических на трение в подшипниках и трение о воздух вращающихся частей машины $P_{мех}$ и из потерь в стали на гистерезис и вихревые токи $P_{от}$. В генераторах с самовозбуждением мощность P_0 включает также мощность, затраченную на создание магнитного потока, т. е. на возбуждение машины.

При нагрузке генератора первичный двигатель затрачивает мощность $P_1 = P_3 + P_0$.

Электромагнитный момент машины

$$M_a = \frac{P_3}{\Omega} \quad (136)$$

где $\Omega = \frac{2\pi n}{60}$ рад/сек — угловая скорость якоря.

Так как

$$P_3 = E I_a \text{ и } E = \frac{pN}{60a} n \Phi,$$

то электромагнитный момент машины определится следующим выражением:

$$M_a = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_a \quad (137)$$

Величины a , p и N постоянны для данной машины, поэтому выражение $\frac{pN}{2\pi a} = K$ представляет собой некоторый постоянный

для данной машины коэффициент и электромагнитный момент равен:

$$M_{\text{э}} = K\Phi I_{\text{я}}, \quad (138)$$

т. е. электромагнитный момент машины пропорционален произведению тока в якоре на магнитный поток полюсов.

§ 111. СПОСОБЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Генераторы постоянного тока могут быть выполнены с магнитным и электромагнитным возбуждением. Для создания магнитного потока в генераторах первого типа используют постоянные магниты,

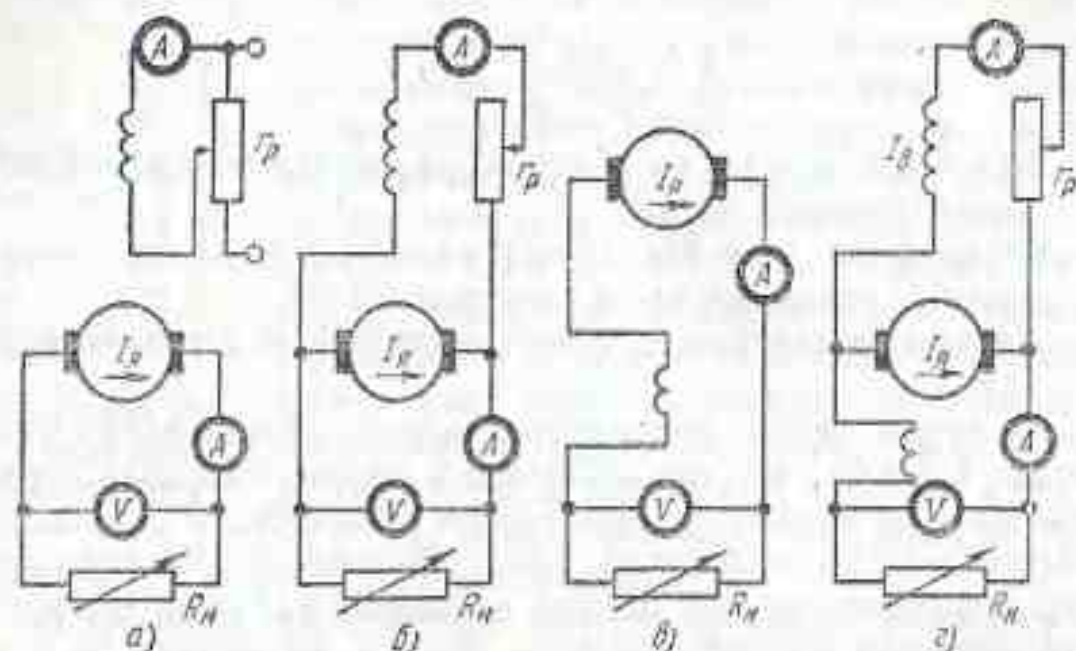


Рис. 143. Схема возбуждения генераторов постоянного тока: а — независимого возбуждения, б — параллельного возбуждения, в — последовательного возбуждения, г — смешанного возбуждения

а в генераторах второго типа — электромагниты. Постоянные магниты применяют лишь в машинах очень малых мощностей. Таким образом, электромагнитное возбуждение является наиболее широко используемым способом для создания магнитного потока. При этом способе возбуждения магнитный поток создается током, протекающим по обмотке возбуждения.

В зависимости от способа питания обмотки возбуждения генераторы постоянного тока могут быть с независимым возбуждением и с самовозбуждением.

При независимом возбуждении (рис. 143, а) обмотка возбуждения включается в сеть вспомогательного источника энергии постоянного тока. Для регулирования тока возбуждения $I_{\text{в}}$ в цепи обмотки включено сопротивление $r_{\text{р}}$. При таком возбуждении ток $I_{\text{в}}$ не зависит от тока в якоре $I_{\text{я}}$.

Недостатком генераторов независимого возбуждения является потребность в дополнительном источнике энергии. Несмотря на то что этот источник обычно имеет малую мощность (несколько процентов мощности генераторов), необходимость в нем является

большим неудобством, поэтому генераторы независимого возбуждения находят очень ограниченное применение только в машинах высоких напряжений, у которых питание обмотки возбуждения от цепи якоря недопустимо по конструктивным соображениям.

Генераторы с самовозбуждением в зависимости от включения обмотки возбуждения могут быть параллельного (рис. 143, б), последовательного (рис. 143, в) и смешанного (рис. 143, г) возбуждения.

У генераторов параллельного возбуждения ток мал (несколько процентов номинального тока якоря), и обмотка возбуждения имеет большое число витков. При последовательном возбуждении ток возбуждения равен току якоря и обмотка возбуждения имеет малое число витков.

При смешанном возбуждении на полюсах генератора помещаются две обмотки возбуждения — параллельная и последовательная.

Процесс самовозбуждения генераторов постоянного тока протекает одинаково при любой схеме возбуждения. Так, например, в генераторах параллельного возбуждения, получивших наиболее широкое применение, процесс самовозбуждения протекает следующим образом.

Какой-либо первичный двигатель вращает якорь генератора, магнитная цепь (ядро и сердечники полюсов) которого имеет небольшой остаточный магнитный поток Φ_0 . Этим магнитным потоком в обмотке вращающегося якоря индуцируется э. д. с. E_0 , составляющая несколько процентов номинального напряжения машины.

Под действием э. д. с. E_0 в замкнутой цепи, состоящей из якоря и обмотки возбуждения, протекает ток $I_{\text{в}}$. Намагничивающая сила обмотки возбуждения $I_{\text{в}}w$ (w — число витков) направлена согласно с потоком остаточного магнетизма, увеличивая магнитный поток машины Φ , что вызывает увеличение как э. д. с. в обмотке якоря E , так и тока в обмотке возбуждения $I_{\text{в}}$. Увеличение последнего вызывает дальнейшее увеличение Φ , что в свою очередь увеличивает E и $I_{\text{в}}$.

Из-за насыщения стали магнитной цепи машины самовозбуждение происходит не беспредельно, а до какого-то определенного напряжения, зависящего от скорости вращения якоря машины и сопротивления в цепи обмотки возбуждения. При насыщении стали магнитной цепи увеличение магнитного потока замедляется и процесс самовозбуждения заканчивается. Увеличение сопротивления в цепи обмотки возбуждения уменьшает как ток в ней, так и магнитный поток, возбуждаемый этим током. Поэтому уменьшается э. д. с. и напряжение, до которого возбуждается генератор.

Изменение скорости вращения якоря генератора вызывает изменение э. д. с., которая пропорциональна скорости, вследствие чего изменяется и напряжение, до которого возбуждается генератор.

Самовозбуждение генератора будет происходить лишь при определенных условиях, которые сводятся к следующим:

1. Наличие потока остаточного магнетизма. При отсутствии этого потока не будет создаваться э. д. с. E_0 , под действием которой в обмотке возбуждения начнет протекать ток, так что возбуждение генератора будет невозможным. Если машина размагничена и не имеет остаточного намагничивания, то по обмотке возбуждения надо пропустить постоянный ток от какого-либо постороннего источника электрической энергии. После отключения обмотки возбуждения машина будет иметь вновь остаточный магнитный поток.

2. Обмотка возбуждения должна быть включена согласно с потоком остаточного магнетизма, т. е. так, чтобы намагничивающая сила этой обмотки увеличивала поток остаточного магнетизма.

При встречном включении обмотки возбуждения ее намагничивающая сила будет уменьшать остаточный магнитный поток и при длительной работе может полностью размагнитить машину. Если обмотка возбуждения оказалась включенной встречно, то необходимо изменить направление тока в ней, т. е. поменять местами провода, подходящие к зажимам этой обмотки.

3. Сопротивление цепи обмотки возбуждения должно быть не чрезмерно большим, при очень большом сопротивлении цепи возбуждения самовозбуждение генератора невозможно.

4. Сопротивление внешней нагрузки должно быть велико, так как при малом сопротивлении ток возбуждения будет также мал и самовозбуждения не произойдет.

§ 112. ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Характеристики генератора определяют его рабочие свойства и представляют зависимость между основными величинами, которыми являются э. д. с. в обмотке якоря E , напряжение на его зажимах U , ток в якоре I_a , ток возбуждения I_f и скорость вращения якоря n .

Характеристики представляют собой зависимости между двумя из указанных основных величин при неизменных остальных. Эти зависимости имеют различный вид для генераторов разных типов.

Снятие всех характеристик машины производится при постоянной скорости вращения якоря, так как при изменении скорости значительно изменяются все характеристики генератора.

Характеристика холостого хода генератора представляет собой зависимость между э. д. с. в якоре и током возбуждения, снятую при отсутствии нагрузки и постоянном числе оборотов.

Для генераторов независимого возбуждения при отсутствии нагрузки (холостой ход) ток в якоре равен нулю. Так как э. д. с., индуцированная в обмотке якоря, равна $E = c n \Phi$, то при постоянной скорости вращения э. д. с. окажется прямо пропорциональной магнитному потоку. Поэтому в измененном масштабе характеристика холостого хода представляет магнитную характеристику машины.

При $I_a = 0$ магнитная цепь машины (главным образом ярмо) имеет некоторый остаточный магнитный поток Φ_0 , который индуцирует в обмотке якоря э. д. с. E_0 (рис. 144, а). Эта э. д. с. составляет

несколько процентов (2—5%) номинального напряжения машины. С увеличением тока в обмотке возбуждения увеличивается как магнитный поток, так и э. д. с., индуцированная в обмотке якоря. Таким образом, при постоянном постепенном увеличении I_f увеличивается и э. д. с. (кривая 1). Если после снятия восходящей ветви зависимости от точки А начать постепенно уменьшать ток возбуждения I_f , то э. д. с. также начнет уменьшаться, но за счет намагничивания стали нисходящая ветвь (кривая 2) пойдет несколько выше

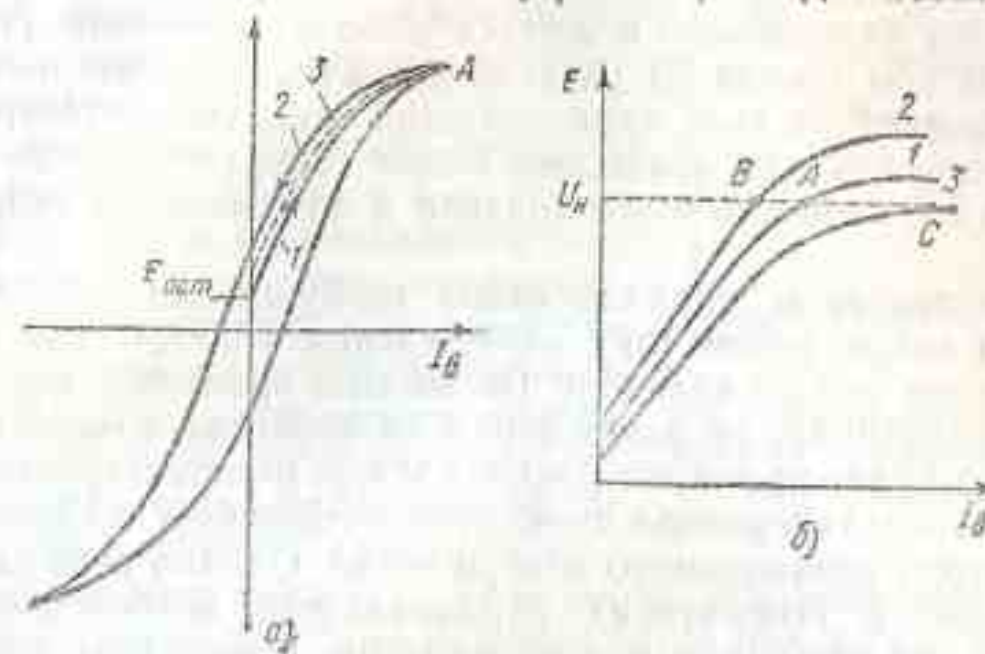


Рис. 144. Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения.

а — при перемагничивании стали, б — при изменении скорости вращения якоря

восходящей ветви этой характеристики. Изменяя I_f не только по величине, но и по направлению, можно снять весь цикл перемагничивания стали машины.

Практически восходящая и нисходящая ветви магнитной характеристики имеют крайне незначительное расхождение, и за основную характеристику принимается средняя зависимость (кривая 3).

На рис. 144, б показаны характеристики холостого хода, снятые при различных скоростях вращения якоря генератора.

Кривая 1 соответствует вращению якоря машины с номинальной скоростью n_n , указанной в паспорте генератора. Для всех машин нормального типа точка номинального напряжения (точка А) находится на перегибе магнитной характеристики, что соответствует наиболее удачным рабочим и регулировочным свойствам генератора.

Выбор точки номинального напряжения на линейном участке магнитной характеристики приводит к резким изменениям напряжения на зажимах генератора при изменениях нагрузки, так как незначительные изменения намагничивающей силы вызывают резкие изменения э. д. с. Выбор этой точки на пологом участке магнитной характеристики приводит к ограничению регулирования напряже-

ния на зажимах генератора, так как для изменения э. д. с. требуются очень большие изменения тока возбуждения.

При изменении скорости вращения якоря генератора изменит свое положение характеристика холостого хода, так как э. д. с. пропорциональна скорости. При $n' > n_n$ характеристика холостого хода пойдет выше (кривая 2), а при $n'' < n_n$ — ниже (кривая 3), чем при номинальной скорости.

Следовательно, при изменении скорости вращения якоря точка номинального напряжения окажется либо на линейном (точка В), либо на пологом (точка С) участке магнитной характеристики, что вызывает изменение всех характеристик генератора. Поэтому первичный двигатель для вращения якоря генератора надо выбрать так, чтобы его скорость была близкой к номинальной скорости генератора.

Для генераторов параллельного возбуждения при холостом ходе ток в якоре равен току возбуждения ($I_a = I_b$). Так как этот ток составляет малую величину (несколько процентов номинального тока генератора), то напряжение на зажимах машины при холостом ходе будет примерно равным э. д. с. и характеристика холостого хода этого генератора практически совпадает с характеристикой генератора независимого возбуждения. Однако весь цикл перемагничивания в генераторах параллельного возбуждения снять нельзя, так как при изменении направления тока в обмотке возбуждения магнитный поток ее будет направлен встречно потоку остаточного магнетизма и самовозбуждение генератора окажется невозможным.

Для генератора последовательного возбуждения характеристика холостого хода смысла не имеет, так как при холостом ходе в якоре и обмотке возбуждения ток равен нулю, и характеристика может быть снята только по схеме независимого возбуждения. Для этого обмотка возбуждения генератора должна быть включена в сеть какого-либо независимого источника тока.

Для генераторов смешанного возбуждения характеристика холостого хода совпадает с характеристикой генератора параллельного возбуждения.

Внешняя характеристика представляет собой зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки. Эта характеристика соответствует естественным условиям работы машины, т. е. машина нерегулируема (сопротивление цепи возбуждения r_b постоянно) и снимается при неизменной скорости вращения.

Для генераторов независимого возбуждения при постоянном r_b неизменен также и ток возбуждения I_b . Внешние характеристики такого генератора показаны на рис. 145.

Кривая 1 представляет собой внешнюю характеристику, снятую на понижение напряжения. Для снятия этой характеристики устанавливается такой ток в обмотке возбуждения, чтобы при холостом ходе генератора напряжение на его зажимах было равно номинальному. Затем нагрузка генератора возрастает при неизменном токе в обмотке возбуждения. С возрастанием нагрузки (тока в якоре

генератора I_a) увеличивается как падение напряжения в сопротивлении его обмотки, так и размагничивающее действие реакции якоря, что вызывает понижение напряжения. При изменении нагрузки от нуля до номинального напряжения на зажимах генератора уменьшается на величину $\Delta U_{\text{пр}}$.

При снятии характеристики на повышение напряжения (кривая 2) устанавливается такой ток возбуждения, чтобы при номинальной нагрузке генератора напряжение на его зажимах было равно номинальному, после чего нагрузка генератора уменьшается.

С уменьшением нагрузки (тока в якоре) также уменьшается как падение напряжения в сопротивлении обмотки якоря и щеточных контактах, так и размагничивающее действие реакции якоря, что вызывает повышение напряжения. При изменении нагрузки от номинальной до 0 напряжение на зажимах генератора увеличивается на величину $\Delta U_{\text{пр}}$. За счет насыщения стали повышение напряжения будет меньше, чем понижение, так как размагничивающее действие реакции якоря будет сказываться тем сильнее, чем меньше степень насыщения стали.

В генераторах параллельного возбуждения при постоянном сопротивлении цепи возбуждения r_b ток возбуждения не остается постоянным, так как зависит от напряжения на зажимах генератора, которое при изменении нагрузки меняется. В генераторах независимого возбуждения увеличение нагрузки вызывает понижение напряжения под воздействием падения напряжения в сопротивлении машины и реакции якоря (кривая 1 на рис. 146).

В генераторах параллельного возбуждения при уменьшении напряжения также уменьшается ток возбуждения, что вызывает уменьшение магнитного потока и понижение напряжения. Следовательно, при увеличении нагрузки напряжение на зажимах генератора этого типа уменьшается в большей мере (кривая 2), чем в генераторах независимого возбуждения, так как, помимо понижения напряжения за счет падения напряжения, в сопротивлении машины и реакции якоря, происходит также понижение напряжения за счет уменьшения тока возбуждения.

Уменьшение внешнего сопротивления нагрузки вызывает увеличение тока до некоторого значения $I_{\text{макс}}$, не превышающего номинальный ток более чем в 2—2,5 раза. При дальнейшем уменьшении

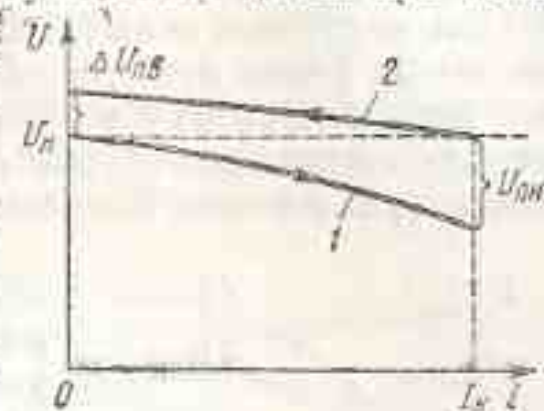


Рис. 145. Внешние характеристики генератора независимого возбуждения

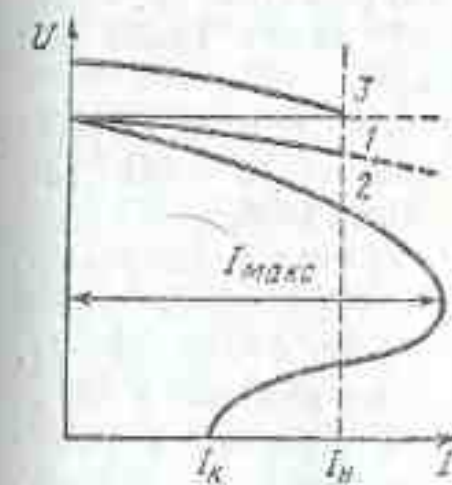


Рис. 146. Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

внешнего сопротивления ток уменьшается и при коротком замыкании будет значительно меньше номинального. Уменьшение сопротивления нагрузки вызывает уменьшение тока возбуждения, так как напряжение генератора понижается. Если ток возбуждения уменьшился настолько, что машина оказалась размагниченной, то э. д. с. понижается в большей степени, чем сопротивление нагрузки, что вызывает уменьшение тока в якоре.

При коротком замыкании генератора параллельного возбуждения ток I_a равен нулю, и обмотка возбуждения не создает магнитного потока. Поэтому в обмотке якоря будет э. д. с. только от остаточного магнитного потока E_0 , имеющая малое значение, и, следовательно, ток короткого замыкания I_k будет также мал.

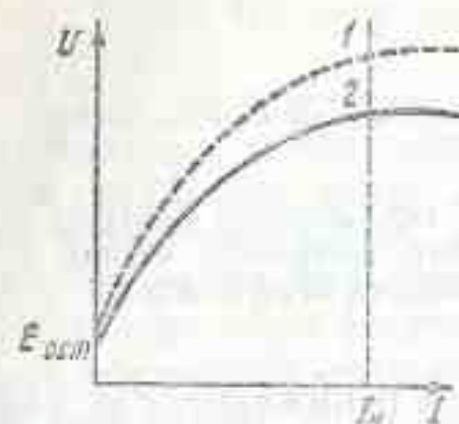


Рис. 147. Внешняя характеристика генератора последовательного возбуждения

Несмотря на малое значение установившегося тока короткого замыкания нельзя сказать, что для генераторов этого типа режим короткого замыкания не представляет опасности. При внезапном коротком замыкании такого генератора ток в обмотке возбуждения мгновенно уменьшится до нуля не может, так же как и магнитный поток. Поэтому в обмотке якоря в момент короткого замыкания будет индуцирована большая э. д. с. и протекает ток во много раз больше номинального, вследствие чего создается интенсивное искрение под щетками, переходящее в круговую огонь, и машина может быть выведена из строя.

Внешняя характеристика на повышение напряжения у генератора параллельного возбуждения (кривая 3) имеет такой же вид, как у генератора независимого возбуждения.

Для генератора последовательного возбуждения внешняя характеристика показана на рис. 147. В генераторах этого типа ток возбуждения равен току якоря ($I_a = I_k$), и при холостом ходе ($I_a = 0$) в обмотке якоря будет создана э. д. с. за счет остаточного магнетизма E_0 . С увеличением нагрузки также увеличится ток в обмотке возбуждения, что вызывает увеличение э. д. с. (кривая 1). Напряжение на зажимах генератора при нагрузке меньше э. д. с. вследствие падения напряжения в сопротивлении машины и реакции якоря (кривая 2). Таким образом, у генератора последовательного возбуждения напряжение резко меняется с изменением нагрузки, поэтому они не нашли широкого применения.

В генераторах смешанного возбуждения возможно согласное и встречное включение последовательной и параллельной обмоток.

При согласном включении обмоток возбуждения результирующая намагничивающая сила, создающая магнитный поток, равна сумме намагничивающих сил параллельной и последовательной обмоток, а при встречном включении — разности этих намагничивающих сил.

На рис. 148 показаны внешние характеристики генератора смешанного возбуждения.

Увеличение нагрузки такого генератора вызывает уменьшение напряжения на его зажимах за счет падения напряжения в его сопротивлении и реакции якоря. Однако с увеличением нагрузки возрастает также ток в последовательной обмотке возбуждения. Поэтому при согласном включении обмоток увеличение нагрузки будет вызывать увеличение магнитного потока и э. д. с. обмотки якоря. Если э. д. с. с увеличением нагрузки возрастает на величину, равную понижению напряжения генератора за счет падения напряжения в его сопротивлении и реакции якоря, то напряжение на зажимах генератора будет практически оставаться неизменным при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной (кривая 1). Такой генератор, называемый нормально возбужденным, не требует изменения тока возбуждения при изменениях нагрузки. При уменьшении числа витков последовательной обмотки э. д. с. с возрастанием нагрузки будет увеличиваться в меньшей степени и не будет компенсировать понижения напряжения, так что напряжение на зажимах генератора будет уменьшаться (кривая 2), т. е. генератор недо возбужден. Если число витков последовательной обмотки возбуждения больше, чем то, которое соответствует нормальному возбуждению машины, то генератор окажется перевозбужденным и напряжение на его зажимах будет увеличиваться с увеличением нагрузки (кривая 3).

При встречном включении обмоток возбуждения внешняя характеристика подобна этой зависимости для генератора параллельного возбуждения (кривая 4), однако ток максимальный I_m и ток короткого замыкания I_k у этого генератора будут меньше соответствующих токов генератора параллельного возбуждения за счет размагничивающего действия намагничивающих сил последовательной обмотки.

Наиболее часто применяют генераторы нормально возбужденные, а также перевозбужденные генераторы, позволяющие компенсировать падение напряжения в линии, соединительных проводах и т. д. с тем, чтобы напряжение на нагрузке оставалось постоянным при изменении тока.

Генераторы со встречным включением обмоток возбуждения не обеспечивают постоянства напряжения и широкого применения не нашли. Их используют в тех случаях, когда необходимо ограничить ток коротких замыканий (например, при электросварке).

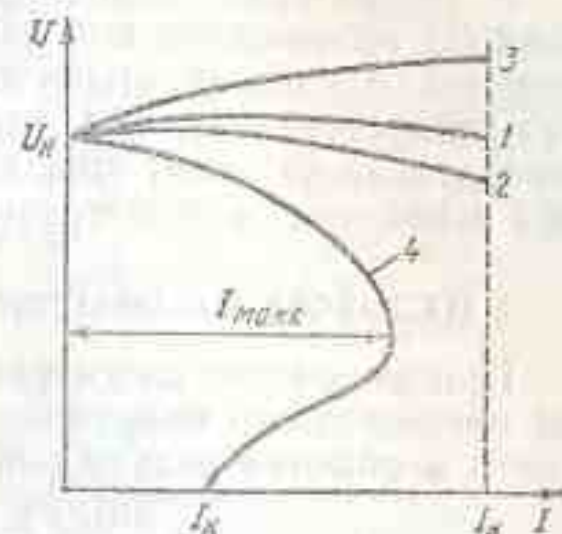


Рис. 148. Внешние характеристики генераторов смешанного возбуждения:

1 — при нормальном возбуждении, 2 — недо возбужденный, 3 — перевозбужденный, 4 — при встречном включении обмоток возбуждения

Регулировочная характеристика генератора показывает, в какой мере следует изменить ток в обмотке возбуждения для того, чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось постоянным при изменении тока нагрузки.

Таким образом, регулировочная характеристика генератора представляет собой зависимость тока возбуждения от тока нагрузки, снимаемая при постоянном напряжении на зажимах генератора.

В генераторах независимого и параллельного возбуждения с увеличением тока нагрузки необходимо увеличить ток возбуждения для того, чтобы скомпенсировать падение напряжения на внутреннем сопротивлении машины и размагничивающее действие потока реакции якоря для обеспечения постоянства напряжения.

В генераторах смешанного возбуждения (нормально возбужденных) напряжение при изменении нагрузки не претерпевает изменений, и, следовательно, необходимость регулирования тока возбуждения отпадает, т. е. регулировочная характеристика в таких генераторах не имеет смысла, так как ток возбуждения постоянен при изменениях тока нагрузки.

§ 113. РАБОТА МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА В РЕЖИМЕ ДВИГАТЕЛЯ

При включении двигателя постоянного тока в сеть под действием приложенного напряжения протекает ток как в обмотке якоря, так и в обмотке возбуждения. Ток возбуждения возбуждает магнитный поток полюсов.

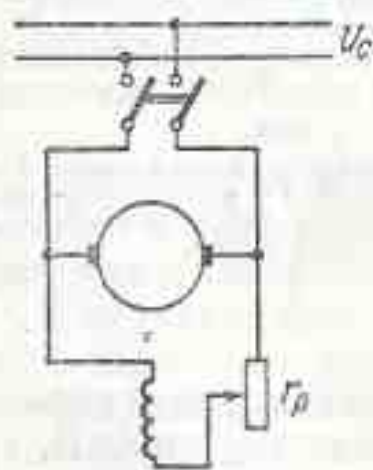


Рис. 149. Схема включения генератора параллельного возбуждения на мощную сеть

В результате взаимодействия тока в проводниках обмотки якоря с магнитным полем полюсов создается вращающий момент и якорь машины приходит во вращение. Таким образом, электрическая энергия, полученная машиной из сети источника энергии, преобразуется в энергию механическую.

Механические силы создаются в результате взаимодействия магнитного поля полюсов с токами в проводниках обмотки якоря. Проводники обмотки якоря уложены в пазах, т. е. окружены сталью зубцов якоря, и эти силы в основном будут приложены к зубцам, так как магнитная проницаемость стали зубцов во много раз больше магнитной проницаемости немагнитной среды пазов, в которой находятся проводники обмотки якоря.

Положим, что генератор параллельного возбуждения работает на сеть большой мощности (рис. 149). Ток нагрузки генератора определяется следующим выражением:

$$I = \frac{E - U}{r_a},$$

где I — ток в обмотке якоря,

r_a — сопротивление цепи этой обмотки,

E — э. д. с., индуцируемая в этой же обмотке,
 U — напряжение сети.

Направление э. д. с. и тока в активных проводниках якоря показано на схеме (рис. 150, а). Машина развивает электромагнитный момент M_0 , являющийся тормозным, т. е. потребляет механическую энергию и вырабатывает энергию электрическую.

Если посредством регулировочного сопротивления понизить ток возбуждения, то уменьшится как магнитный поток, так и э. д. с., индуцируемая в обмотке якоря. Это вызовет уменьшение нагрузки генератора. Изменяя сопротивление регулировочного реостата, можно довести ток возбуждения до такой величины, при которой э. д. с. в обмотке якоря равна напряжению сети ($E=U$) и ток в якоря равен нулю, т. е. генератор работает холостую.

Если ток возбуждения окажется меньше тока, соответствующего холостой работе генератора, то э. д. с. обмотки якоря будет меньше напряжения сети, и ток в якоря изменит направление на обратное (рис. 150, б).

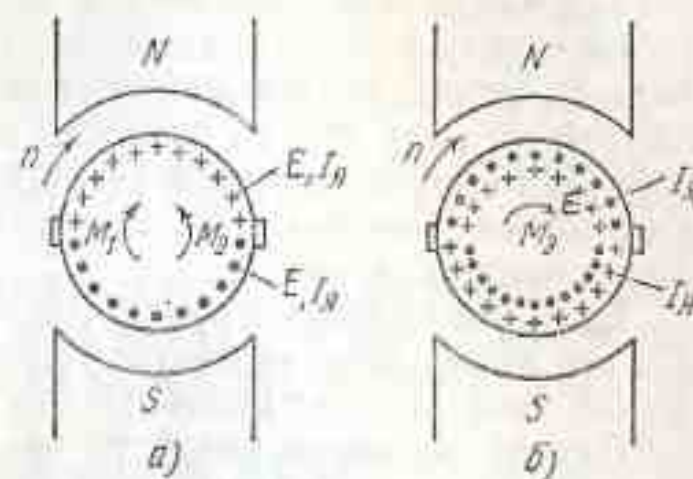


Рис. 150. Схема работы машины постоянного тока в режимах: а — генератора, б — двигателя

При изменении направления тока в проводниках обмотки якоря также изменится направление электромагнитного момента M_0 , развиваемого машиной, т. е. момент станет вращающим. Таким образом, машина, потребляя электрическую энергию, вырабатывает энергию механическую, т. е. работает двигателем.

Если отключить первичный двигатель, то якорь машины будет продолжать вращаться под действием развиваемого электромагнитного момента M_0 .

При вращении якоря в проводниках его обмотки индуцируется э. д. с., направление которой противоположно направлению тока. Поэтому ее называют противо-э. д. с. или обратной э. д. с.

Противо-э. д. с. играет роль регулятора потребляемой мощности, т. е. изменение потребляемого тока происходит вследствие изменения противо-э. д. с. Противо-э. д. с. равна:

$$E = Cn\Phi.$$

Вращающий момент, развиваемый двигателем,

$$M_0 = K\Phi I_a.$$

Приложенное напряжение уравновешено противо-э. д. с. и падением напряжения в сопротивлении обмотки якоря и щеточных контактов. Поэтому для двигателя уравнение равновесия э. д. с. примет следующий вид:

$$U = E + I_a r_a.$$

где E — составляющая приложенного напряжения, которая уравновешивает противо-э. д. с., т. е. величина, обратная противо-э. д. с.

Ток в обмотке якоря определяется следующим выражением:

$$I_a = \frac{U - E}{r_a} \quad (139)$$

Число оборотов якоря двигателя

$$n = \frac{U - I_a r_a}{C\Phi} \quad (140)$$

Условием установившегося режима работы двигателя является равенство моментов вращающего и тормозного. Если вращающий момент, развиваемый двигателем M_o , уравновешен тормозным моментом на валу M_T , то скорость вращения якоря остается постоянной. При нарушении равновесия моментов появляется дополнительный момент, создающий положительное или отрицательное ускорение вращения якоря.

Если увеличить нагрузку (тормозной момент на валу двигателя M_T), то равновесие моментов нарушится ($M_o < M_T$) и скорость вращения якоря начнет уменьшаться.

При уменьшении скорости вращения якоря уменьшается также противо-э. д. с., что вызывает увеличение как тока в якоре, так и вращающего момента двигателя. Изменение скорости вращения, противо-э. д. с. и тока в якоре происходит до восстановления равновесия моментов, т. е. до тех пор, пока вращающий момент не окажется вновь равным тормозному моменту на валу двигателя.

Если равновесие моментов не восстанавливается и тормозной момент остается всегда больше момента вращающего ($M_T > M_o$), скорость вращения уменьшается непрерывно до остановки двигателя. Такие случаи могут возникать при больших тормозных моментах на валу и значительных понижениях напряжения сети.

При уменьшении нагрузки на валу двигателя ($M_o > M_T$) скорость вращения якоря начнет увеличиваться, что вызывает увеличение противо-э. д. с. в его обмотке. Ток в обмотке якоря начнет уменьшаться, уменьшая вращающий момент двигателя. Изменение скорости, противо-э. д. с. и тока в якоре будет протекать также до восстановления равновесия моментов ($M_o = M_T$).

Однако в двигателях постоянного тока сравнительно часто создаются условия, при которых равновесие моментов не восстанавливается при любом изменении скорости, так что вращающий момент всегда остается больше тормозного момента на валу двигателя ($M_o > M_T$). В таких случаях скорость вращения якоря непрерывно увеличивается, теоретически стремясь к бесконечности. Практически при значительном превышении номинальной скорости машина разрушается — рвутся бандажи, скрепляющие лобовые соединения обмотки, проводники обмотки выходят из пазов и т. д. Такой аварийный режим называется *разносом двигателя*.

Направление вращения якоря двигателя зависит от полярности полюсов и от направления тока в проводниках обмотки якоря.

Таким образом, для реверсирования двигателя, т. е. для изменения направления вращения якоря, нужно либо изменить полярность полюсов, переключив обмотку возбуждения, либо изменить направление тока в обмотке якоря.

Обмотка возбуждения обладает значительной индуктивностью, и переключение ее нежелательно. Поэтому реверсирование двигателей постоянного тока обычно заключается в переключении обмотки якоря.

§ 114. ПУСК ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В начальный момент пуска в ход якорь двигателя неподвижен и противо-э. д. с. равна нулю ($E=0$). При непосредственном включении двигателя в сеть в обмотке якоря будет протекать чрезмерно большой ток.

$$I_{пуск} = \frac{U}{r_a} \quad (141)$$

Поэтому непосредственное включение в сеть допускается только для двигателей очень малой мощности, у которых падение напряжения в якоре представляет относительно большую величину и броски тока не столь велики.

В машинах постоянного тока большой мощности падение напряжения в обмотке якоря при полной нагрузке составляет несколько процентов от номинального напряжения, т. е.

$$I_a r_a = (0,02 \div 0,1) U \quad (142)$$

Следовательно, пусковой ток в случае включения двигателя в сеть с номинальным напряжением во много раз превышает номинальный ($I_{пуск} \gg I_n$).

Большой пусковой ток является опасным как для машины, так и для приемника механической энергии, находящегося на валу двигателя. При большом токе нагревается обмотка якоря машины и образуется интенсивное искрение под щетками, вследствие которого коллектор может выйти из строя. На валу двигателя создаются механические удары, так как при большом токе вращающий момент будет также большим.

Для ограничения пускового тока используют пусковые реостаты, включаемые последовательно с якорем двигателя при пуске в ход. Пусковые реостаты представляют собой проволочные сопротивления, рассчитываемые на кратковременный режим работы, и выполняются ступенчатыми, что дает возможность изменять ток в якоре двигателя в процессе пуска его в ход.

Схема двигателя параллельного возбуждения с пусковым реостатом показана на рис. 151. Пусковой реостат этого двигателя

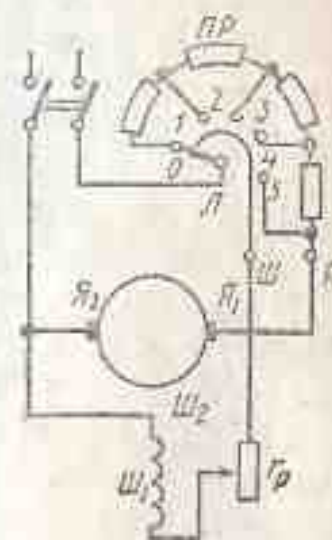


Рис. 151. Схема двигателя параллельного возбуждения с пусковым реостатом

имеет три зажима, обозначаемые буквами Л, Я, Ш. Зажим Л соединен с движком реостата и подключается к одному из полюсов рубильника (к линии). Зажим Я соединяется с сопротивлением реостата и подключается к зажиму якоря Я. Зажим Ш соединен с металлической шиной, помещенной на реостате (шунт). Движок реостата скользит по этой шине так, что между ними имеется непрерывный контакт. К зажиму Ш через регулировочное сопротивление r_p присоединяется обмотка возбуждения Ш₁. Зажим якоря Я₂ и обмотки возбуждения Ш₂ соединены между собой перемычкой и подключены ко второму полюсу рубильника, включающего двигатель в сеть.

При пуске в ход включается рубильник и движок реостата переводится на контакт 1, так что последовательно с якорем соединено полное сопротивление пускового реостата ПР, которое выбирается таким, чтобы наибольший ток при пуске в ход $I_{\text{макс}}$ не превышал номинальный ток более чем в 1,7—2,5 раза, т. е.

$$r_{\text{п}} = \frac{U}{I_{\text{макс}}} - r_{\text{я}} \quad (143)$$

При включении двигателя в сеть по обмотке возбуждения также протекает ток, образующий магнитный поток. В результате взаимодействия тока в якоре с магнитным полем полюсов создается пусковой момент.

Если пусковой момент окажется больше тормозного момента на валу двигателя ($M_{\text{пуск}} > M_{\text{т}}$), то якорь машины придет во вращение. Под действием инерции скорость вращения не может претерпевать мгновенных изменений и число оборотов якоря будет постепенно увеличиваться.

При увеличении скорости вращения якоря увеличивается противо-э. д. с. и ток в якоре начнет уменьшаться, что вызывает уменьшение вращающего момента двигателя.

В рабочем режиме сопротивление пускового реостата должно быть полностью выведено, так как оно рассчитано на кратковременный режим работы и при длительном прохождении тока выйдет из строя.

Когда ток в якоре уменьшится до небольшого значения $I_{\text{мин}}$, движок пускового реостата переводится на контакт 2. При этом сопротивление пускового реостата уменьшится на одну ступень, что вызовет увеличение тока. Сопротивления всех ступеней пускового реостата выбирают так, чтобы при переводе движка реостата с одного контакта на другой ток в якоре изменялся от $I_{\text{мин}}$ до $I_{\text{макс}}$.

Увеличение тока в якоре вызывает увеличение вращающего момента, вследствие чего скорость вращения вновь увеличивается. С увеличением скорости вращения якоря возрастает противо-э. д. с., что вызывает уменьшение тока в якоре. Когда ток в якоре достигает вновь небольшого значения, движок реостата переводится на контакт 3.

Таким образом, сопротивление пускового реостата постепенно (ступенями) уменьшается, пока оно полностью не будет выведено

(движок реостата на контакте 5), и в рабочем режиме ток и скорость якоря принимают установившиеся значения, соответствующие тормозному моменту на валу двигателя.

Наименьший ток при пуске в ход зависит от режима работы двигателя. Если двигатель пускается при полной нагрузке, то $I_{\text{мин}} = 1,1 I_{\text{н}}$. При пуске двигателя без нагрузки или при малых нагрузках этот ток может быть меньше номинального тока двигателя.

Число ступеней пускового реостата зависит от разности $I_{\text{макс}} - I_{\text{мин}}$, причем чем меньше разность этих токов, тем больше число ступеней. Обычно пусковые реостаты имеют от 2 до 7 ступеней. При пуске двигателя в ход регулировочное сопротивление r_p в цепи возбуждения должно быть полностью выведено, т. е. ток возбуждения должен быть наибольшим, что дает возможность уменьшить пусковой ток. Для пуска двигателя необходимо создать пусковой момент, больший тормозного момента на валу ($M_{\text{пуск}} > M_{\text{т}}$). Так как $M_{\text{пуск}} = K \Phi I_{\text{я}}$, то для уменьшения пускового тока надо увеличить магнитный поток, т. е. увеличить ток в обмотке возбуждения.

Металлическая шина пускового реостата имеет соединение с зажимом 1. Это необходимо для того, чтобы при отключении двигателя от сети не было разрыва цепи обмотки возбуждения, имеющей значительную индуктивность.

При отключении двигателя движок пускового реостата переводится на холостой контакт 0 и рубильник отключается. При этом обмотка возбуждения будет замкнута на сопротивление пускового реостата и якоря, что дает возможность избежать перенапряжений и дугообразования.

§ 115. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Рабочие свойства двигателей определяются их рабочими характеристиками, представляющими собой зависимости числа оборотов n , вращающего момента M_2 , потребляемого тока I , мощности P_1 и к. п. д. η от полезной мощности на валу P_2 . Эти зависимости соответствуют естественным условиям работы двигателя, т. е. машина не регулируется и напряжение сети остается постоянным. Так как при изменении полезной мощности P_2 (т. е. нагрузки на валу) изменяется также и ток в якоре машины, то рабочие характеристики часто строятся в зависимости от тока в якоре. Зависимости вращающего момента и скорости вращения от тока в якоре для двигателя параллельного возбуждения изображены на рис. 152, а схема его показана выше (см. рис. 151).

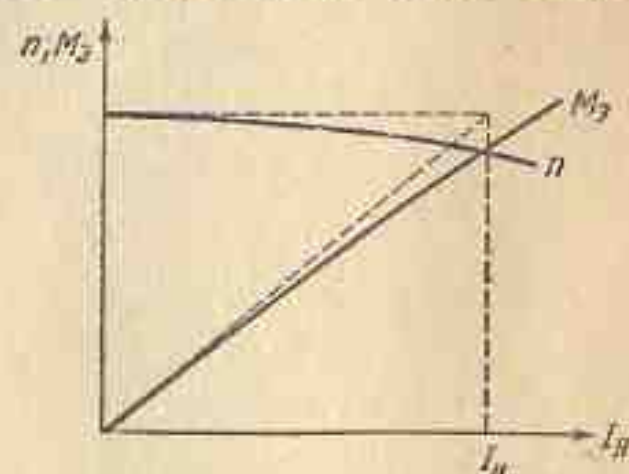


Рис. 152. Характеристики двигателя параллельного возбуждения

Число оборотов двигателя определяется следующим выражением:

$$n = \frac{U - I_a r_a}{C\Phi} \quad (144)$$

С увеличением нагрузки на валу двигателя увеличивается также и ток в якоре. Это вызывает увеличение падения напряжения в сопротивлении обмотки якоря и щеточных контактах.

Так как ток возбуждения остается неизменным (машина нерегулируема), то магнитный поток также постоянен. Однако при увеличении тока в якоре увеличивается размагничивающее действие потока реакции якоря и магнитный поток Φ несколько уменьшится. Увеличение $I_a r_a$ вызывает уменьшение скорости двигателя, а уменьшение Φ увеличивает скорость. Обычно падение напряжения влияет на изменение скорости в несколько большей степени, чем реакция якоря, так что с увеличением тока в якоре скорость уменьшается. Изменение скорости у двигателя этого типа незначительно и не превышает 5% при изменении нагрузки от нуля до номинальной, т. е. двигатели параллельного возбуждения имеют жесткую скоростную характеристику.

Вращающий момент двигателя

$$M_s = K\Phi I_a \quad (145)$$

При неизменном магнитном потоке зависимость момента от тока в якоре представится прямой линией. Но под воздействием

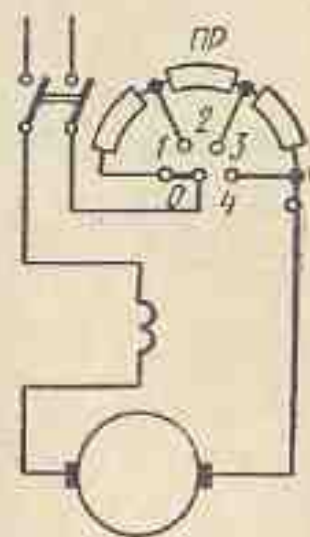


Рис. 153. Схема двигателя последовательного возбуждения

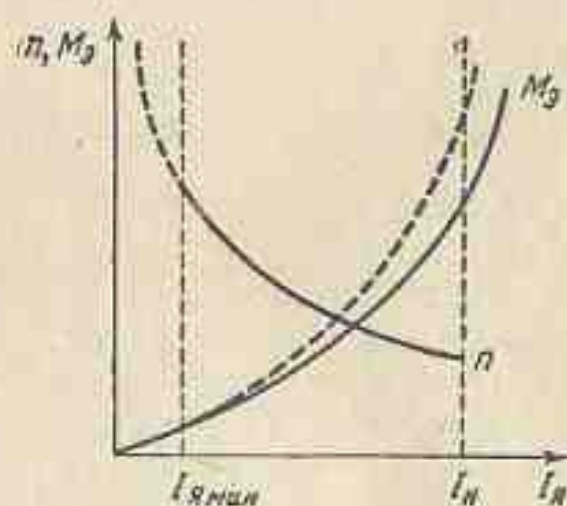


Рис. 154. Характеристики двигателя последовательного возбуждения

реакции якоря с увеличением нагрузки происходит некоторое уменьшение магнитного потока и зависимость момента пойдет несколько ниже прямой линии.

Схема двигателя последовательного возбуждения показана на рис. 153. Пусковой реостат этого двигателя имеет только два зажима, так как обмотка возбуждения и якорь образуют одну после-

довательную цепь. Характеристики двигателя изображены на рис. 154. Число оборотов двигателя последовательного возбуждения определяется следующим выражением:

$$n = \frac{U - I_a (r_a + r_c)}{C\Phi}$$

где r_c — сопротивление последовательной обмотки возбуждения.

В двигателе последовательного возбуждения магнитный поток не остается постоянным, а резко изменяется с изменением нагрузки, что вызывает значительное изменение скорости. Так как падение напряжения в сопротивлении якоря и в обмотке возбуждения очень мало в сравнении с приложенным напряжением, то число оборотов можно приближенно определить следующим выражением:

$$n = \frac{U}{C\Phi} \quad (146)$$

Если пренебречь насыщением стали, то можно считать магнитный поток пропорциональным току в обмотке возбуждения, который равен току в якоре. Следовательно, у двигателя последовательного возбуждения скорость вращения обратно пропорциональна току в якоре и число оборотов резко уменьшается с увеличением нагрузки, т. е. двигатель имеет мягкую скоростную характеристику. С уменьшением нагрузки скорость вращения двигателя увеличивается. При холостом ходе ($I_a = 0$) скорость двигателя бесконечно возрастает, т. е. двигатель идет в разнос.

Таким образом, характерным свойством двигателей последовательного возбуждения является недопустимость сброса нагрузки, т. е. работы вхолостую или при малых нагрузках. Двигатель имеет минимальную допустимую нагрузку, составляющую 25—30% номинальной. При нагрузке меньше минимально допустимой скорость двигателя резко увеличивается, что может вызвать его разрушение. Поэтому, когда возможны сбросы или резкие уменьшения нагрузки, использование двигателей последовательного возбуждения является недопустимым.

В двигателях очень малых мощностей сброс нагрузки не вызывает разброса, так как механические потери двигателя будут достаточно большой нагрузкой для него.

Вращающий момент двигателя последовательного возбуждения, учитывая пропорциональную зависимость между магнитным потоком и током в якоре ($\Phi = C'I_a$), можно определить следующим выражением:

$$M_s = K\Phi I_a = K' I_a^2 \quad (147)$$

где $K' = KC'$,

т. е. вращающий момент пропорционален квадрату тока. Однако при больших токах сказывается насыщение стали и зависимость момента приближается к прямой линии. Таким образом, двигатели этого типа развивают большие вращающие моменты при малых оборотах, что имеет существенное значение при

При работе машины генератором полезная мощность ее равна:

$$P_2 = UI, \quad (150)$$

где U — напряжение на зажимах генератора,

I — ток в нагрузке,
потребляемая мощность

$$P_1 = P_2 + P_{ст} + P_{об} + P_{мех} = UI + P_{ст} + P_{об} + P_{мех} \quad (151)$$

и к. п. д.

$$\eta = \frac{UI}{UI + P_{ст} + P_{об} + P_{мех}} \cdot 100\%.$$

При работе машины двигателем потребляемая мощность

$$P_1 = UI, \quad (152)$$

где U — напряжение питающей сети,

I — ток, потребляемый двигателем из сети;
полезная мощность

$$P_2 = P_1 - P_{ст} - P_{об} - P_{мех} = UI - P_{ст} - P_{об} - P_{мех} \quad (153)$$

и к. п. д.

$$\eta = \frac{UI - P_{ст} - P_{об} - P_{мех}}{UI} \cdot 100\%. \quad (154)$$

§ 118. КОЛЛЕКТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Коллекторные двигатели переменного тока, характеристики которых подобны характеристикам двигателей постоянного тока, имеют хорошие регулировочные и пусковые свойства. Недостатком их является сравнительно высокая стоимость и ограниченная мощность (до 50—70 кВт), что объясняется трудными условиями коммутации.

Однофазные коллекторные двигатели малой мощности находят применение в установках связи, автоматики и для бытовых целей.

Принципиально любой двигатель постоянного тока может работать от сети переменного тока, так как развиваемый двигателями вращающий момент, зависящий от произведения тока в якоре и магнитного потока полюсов, не меняет направления при одновременном изменении направления тока в якоре и магнитного потока полюсов.

Для создания достаточно большого вращающего момента необходима одновременность изменения направления тока в якоре и магнитного потока полюсов, т. е. совпадение по фазе тока в якоре и потока полюсов.

В двигателе параллельного возбуждения такого совпадения по фазе обеспечить нельзя, так как магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, отстаёт от приложенного напряжения примерно на четверть периода.

В двигателе последовательного возбуждения ток в якоре является одновременно и током возбуждения. Пренебрегая углом сдви-

га фаз между током возбуждения и магнитным потоком, можно считать совпадающими по фазе ток в якоре и магнитный поток, т. е. их изменения одновременными.

В конструктивном отношении коллекторные двигатели переменного тока имеют существенное отличие от машин постоянного тока. Магнитопровод статора коллекторного двигателя набирается из листовой стали для уменьшения потерь на вихревые токи. Поток реакции якоря создает э. д. с. самоиндукции, которая в сильной степени снижает коэффициент мощности. Для устранения действия реакции якоря на статоре коллекторного двигателя помещается компенсационная обмотка, магнитный поток которой направлен встречно потоку реакции якоря. Компенсационная обмотка может быть соединена последовательно с якорем, может иметь с якорем трансформаторную связь и может быть на статоре помещена одна обмотка, являющаяся одновременно и обмоткой возбуждения, и компенсационной.

Иногда применяют двигатели с трансформаторной связью статора и ротора, называемые индукционными или репульсионными коллекторными двигателями. Они имеют неявнополюсный статор, набранный из листовой электротехнической стали. Такие двигатели применяют главным образом в бытовых установках для непосредственного присоединения к сети.

Помимо обмоток возбуждения и компенсационной, на статоре коллекторного двигателя помещается обмотка дополнительных полюсов, предназначенная для улучшения коммутации.

При малых мощностях коллекторные двигатели делают универсальными, т. е. предназначенными для работы как от сети переменного тока, так и от сети постоянного тока.

Универсальные двигатели обычно выполняют без компенсационной обмотки (рис. 155). При работе от сети постоянного тока двигатель приключается зажимами «0» и «=», а при работе от сети переменного тока — зажимами «0» и «~». Таким образом, при работе на переменном токе число витков обмотки возбуждения значительно меньше, чем при работе на постоянном токе, так что коэффициент мощности оказывается сравнительно высоким, несмотря на отсутствие компенсационной обмотки.

Характеристики универсального коллекторного двигателя при работе от сети переменного тока аналогичны характеристикам двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением.

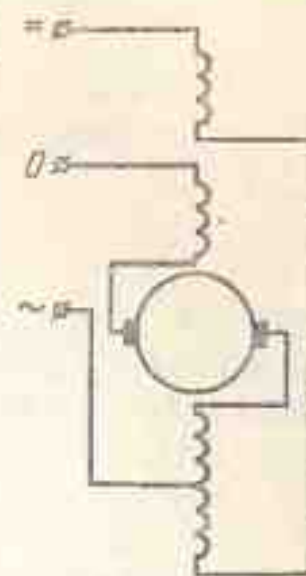


Рис. 155. Схема универсального коллекторного двигателя

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия и устройство генератора постоянного тока.
2. От чего зависит э. д. с. машины постоянного тока?
3. Для чего устанавливают дополнительные полюсы?

4. Как протекает процесс самовозбуждения генератора?
5. Изобразите и поясните внешние характеристики генераторов.
6. Как осуществить реверсирование двигателя постоянного тока?
7. От чего зависит вращающий момент и скорость вращения двигателя постоянного тока?
8. Изобразите и поясните характеристики двигателей постоянного тока.
9. Каким образом регулируют скорость вращения двигателей постоянного тока?

ГЛАВА XI ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ

Для включения и выключения электрических машин, приборов и сетей, а также для управления работой различных электротехнических установок и защиты их отдельных элементов при нарушении нормальных режимов работы используют вспомогательную электрическую аппаратуру, выключатели низкого и высокого напряжения, рубильники, переключатели, минимальные и максимальные автоматы, реостаты, контакторы, контроллеры, реле и магнитные пускатели.

Аппаратура управления, регулирования и защиты делится по способу управления на ручную и дистанционную, а также по напряжению сети, в которую они включаются.

Электрическая аппаратура является одним из важных звеньев современного производства. При ее помощи осуществляются все процессы управления электрическим оборудованием.

§ 119. ВЫКЛЮЧАТЕЛИ И РУБИЛЬНИКИ

Поворотный выключатель (рис. 156) служит для включения и выключения приемников электрической энергии напряжением до 220 в.

Простейшим выключателем низкого напряжения, рассчитанным на малую мощность, является кнопочный выключатель (рис. 157). Он состоит из подвижной и неподвижной частей.

Подвижная часть (вверху) имеет две кнопки 1, трехплечий рычаг 3, закрепленный на оси 2, и замыкатель 4 с латунной контактной пластиной 5. В корпусе замыкателя помещаются спиральная пружина 6 и стальной шарик 7.

Неподвижная часть (внизу) состоит из двух контактов с контактными пружина-

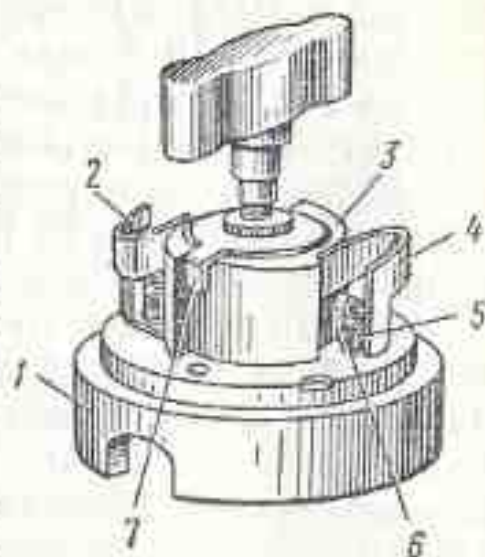


Рис. 156. Поворотный выключатель:

1 — основание, 2 и 4 — неподвижные пружинящие контакты, 3 — барабан, 5 — контакты для присоединения проводов, 6 — зажимной винт, 7 — контактная пластина

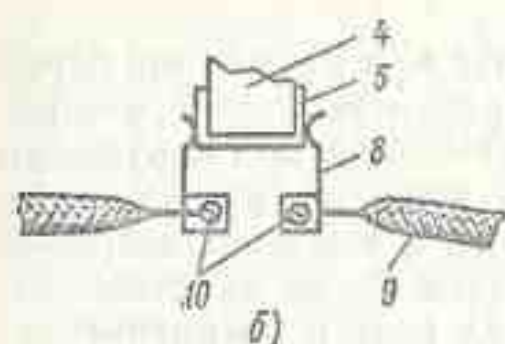


Рис. 157. Кнопочный выключатель:
а — подвижная часть, б — неподвижная часть

При нажатии кнопки 1, расположенной слева, опускается трехплечий рычаг 3. Его правое плечо вместе со второй кнопкой поднимается вверх. Одновременно среднее третье плечо рычага действует через шарик 7 и спиральную пружину 6 на замыкатель 4, перемещая его вправо. Последний своей пластиной 5 соединяет контактные пружины 8 неподвижной части выключателя и таким образом замыкает цепь проводов 9.

При нажатии кнопки, расположенной справа, замыкатель перемещается влево и размыкает цепь.

Для включения, выключения и переключения электрических цепей постоянного напряжения до 220 в и переменного напряжения до 380 в широко используются пакетные выключатели и переключатели. Пакетные выключатели и переключатели делятся на однополюсные, двухполюсные и трехполюсные, изготовляются для цепей постоянного тока до 400 а и переменного тока до 250 а, в зависимости от величины предельного тока имеют различные размеры. Они обозначаются несколькими буквами и цифрами, например ПВ2—25: П — пакетный, В — выключатель, 2 — двухполюсный, 25 — сила тока; ППЗ — 10/Н2: П — пакетный, П — переключатель, 3 — трехполюсный, 10 — сила тока, Н2 — на два направления.

Пакетный выключатель и переключатель состоит из переключающего механизма и контактной системы.

Контактная система выполняется из отдельных контактных секций, которые собираются в пакет. Каждая секция (рис. 158, а), образующая один полюс контактной системы, состоит из изолятора 1, в пазах которого находятся неподвижные контакты 2 с зажимами 3 для подключения проводов, подвижных пружинящих контактов 4 с квадратными отвер-

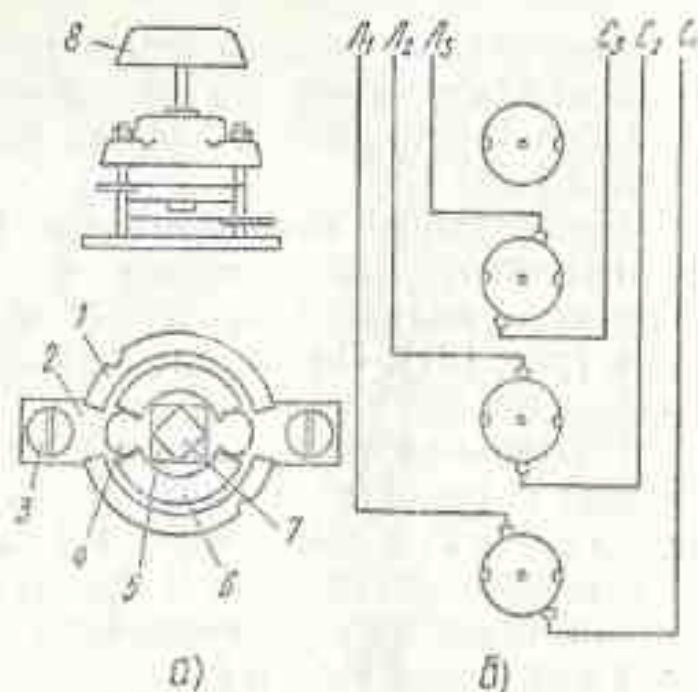


Рис. 158. Пакетный выключатель:
а — устройство, б — схема

стиями 5 и фибровых шайб 6. В квадратные отверстия подвижных контактов помещается изолированный переключающий валик 7. При повороте рукоятки 8 этого валика происходит коммутация электрических цепей, в которые включен пакетный выключатель или переключатель (рис. 158, б).

Для включения и выключения электрических установок с напряжением до 500 в при токах, превышающих 6 а, применяют рубильники.

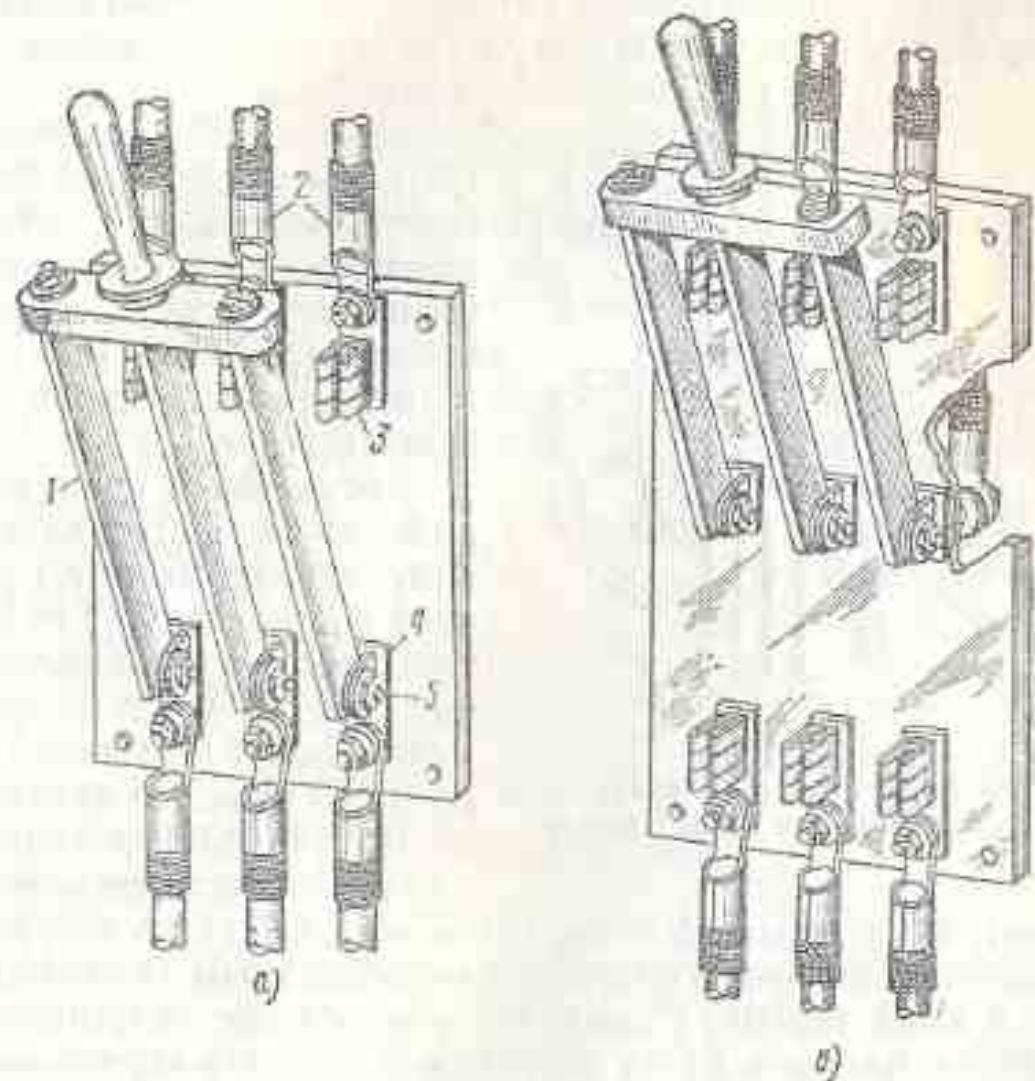


Рис. 159. Рубильники:
а — трехполюсный, б — перекидной

Существуют однополюсные, двухполюсные и трехполюсные рубильники, которые монтируются на шитах.

Основными частями трехполюсного рубильника (рис. 159, а) являются медные ножи 1, которые могут поворачиваться на осях 5, укрепленных в неподвижных контактах 4.

К болтам контактов при помощи гаек присоединяются провода от приемника электрической энергии. При замыкании цепи медные ножи 1 входят в промежутки между пружинящими контактами 3, к зажимам которых подключены провода 2 от электрической сети.

Наряду с обычными рубильниками применяют рубильники-переключатели, которые называются также перекидными (рис. 159, б).

Переключатели, кроме верхних пружинящих контактов, имеют такое же количество нижних контактов. Ножи перекидного рубиль-

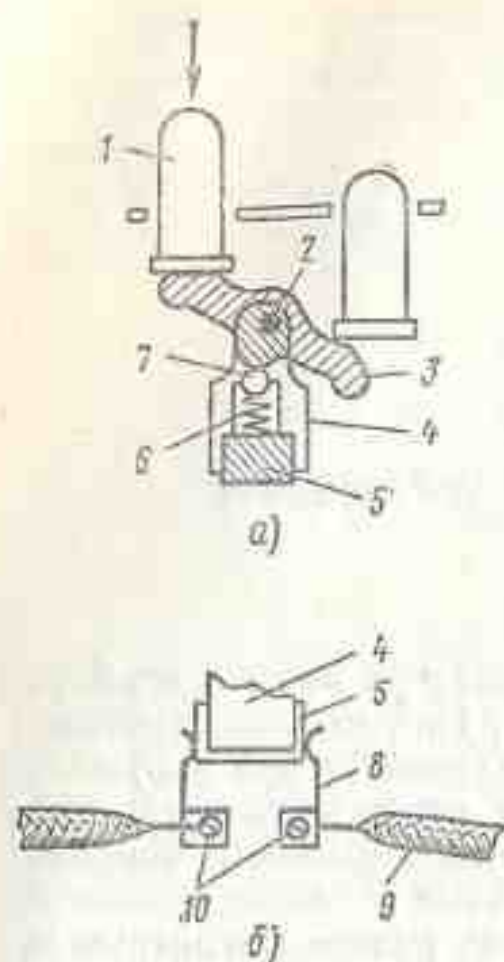


Рис. 157. Кнопочный выключатель:
а — подвижная часть, б — неподвижная часть

симости от величины предельного тока имеют различные размеры. Они обозначаются несколькими буквами и цифрами, например ПВ2—25: П — пакетный, В — выключатель, 2 — двухполюсный, 25 — сила тока; ППЗ — 10/Н2: П — пакетный, П — переключатель, 3 — трехполюсный, 10 — сила тока, Н2 — на два направления.

Пакетный выключатель и переключатель состоят из переключающего механизма и контактной системы.

Контактная система выполняется из отдельных контактных секций, которые собираются в пакет. Каждая секция (рис. 158, а), образующая один полюс контактной системы, состоит из изолятора 1, в пазах которого находятся неподвижные контакты 2 с зажимами 3 для подключения проводов, подвижных пружинящих контактов 4 с квадратными отвер-

стиями 5 и фибровых шайб 6. В квадратные отверстия подвижных контактов помещается изолированный переключающий валик 7. При повороте рукоятки 8 этого валика происходит коммутация электрических цепей, в которые включен пакетный выключатель или переключатель (рис. 158, б).

При нажатии кнопки 1, расположенной слева, опускается трехплечий рычаг 3. Его правое плечо вместе со второй кнопкой поднимается вверх. Одновременно среднее третье плечо рычага действует через шарик 7 и спиральную пружину 6 на замыкатель 4, перемещая его вправо. Последний своей пластиной 5 соединяет контактные пружины 8 неподвижной части выключателя и таким образом замыкает цепь проводов 9.

При нажатии кнопки, расположенной справа, замыкатель перемещается влево и размыкает цепь.

Для включения, выключения и переключения электрических цепей постоянного напряжения до 220 в и переменного напряжения до 380 в широко используются пакетные выключатели и переключатели. Пакетные выключатели и переключатели делятся на однополюсные, двухполюсные и трехполюсные, изготавливаются для цепей постоянного тока до 400 а и переменного тока до 250 а, в зави-

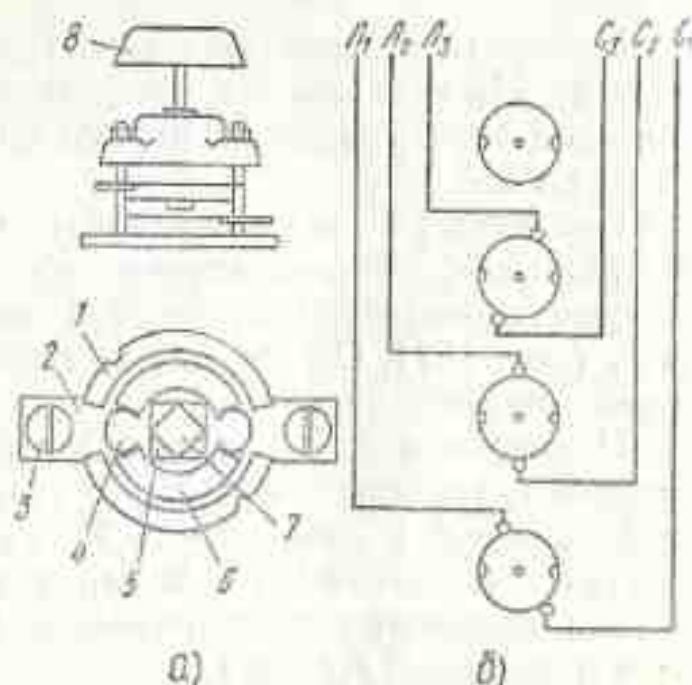


Рис. 158. Пакетный выключатель:
а — устройство, б — схема

существом однополюсные, двухполюсные и трехполюсные рубильники, которые монтируются на щитах.

Основными частями трехполюсного рубильника (рис. 159, а) являются медные ножи 1, которые могут поворачиваться на осях б, укрепленных в неподвижных контактах 4.

К болтам контактов при помощи гаек присоединяются провода от приемника электрической энергии. При замыкании цепи медные ножи 1 входят в промежутки между пружинящими контактами 3, к зажимам которых подключены провода 2 от электрической сети.

Наряду с обычными рубильниками применяют рубильники-переключатели, которые называются также перекидными (рис. 159, б).

Переключатели, кроме верхних пружинящих контактов, имеют такое же количество нижних контактов. Ножи перекидного рубиль-

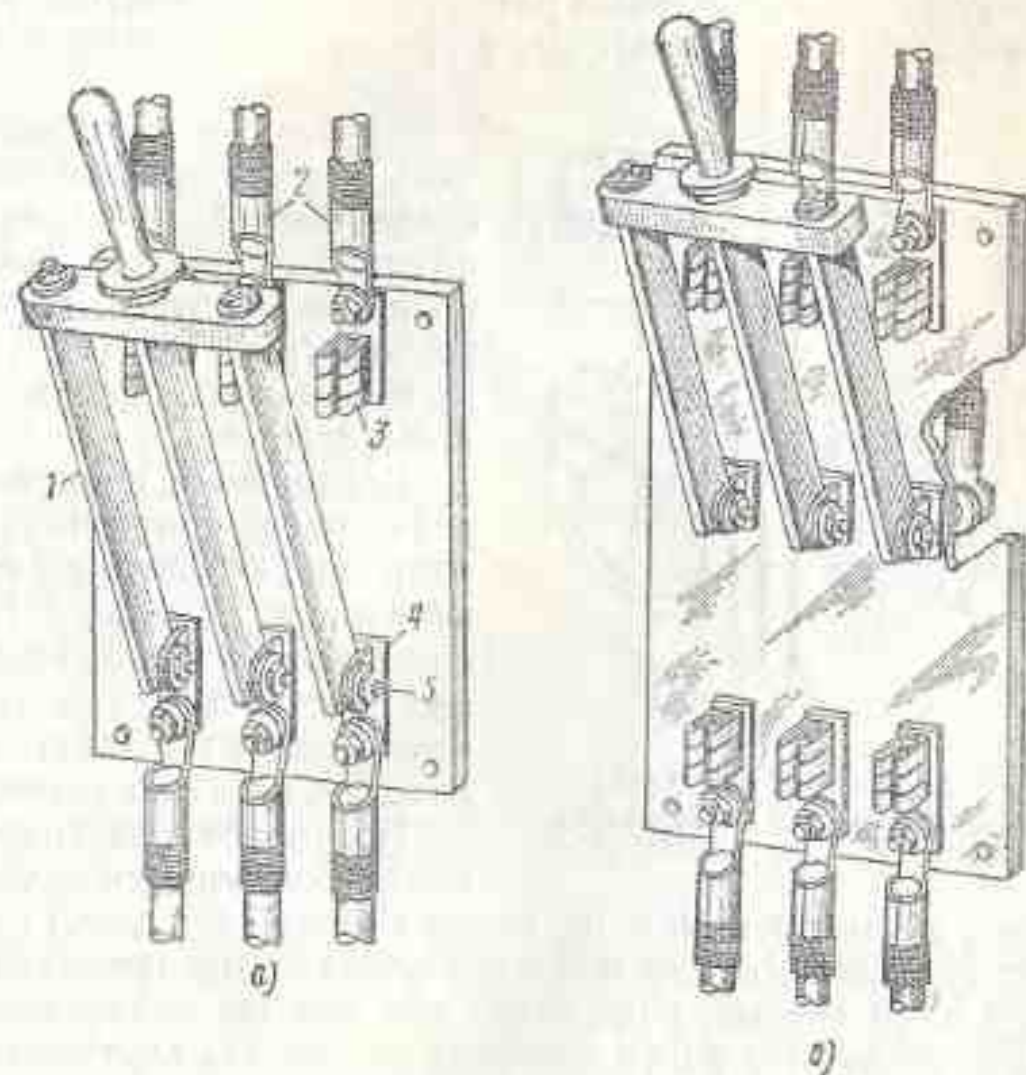


Рис. 159. Рубильники:
а — трехполюсный, б — перекидной

Переключатели, кроме верхних пружинящих контактов, имеют такое же количество нижних контактов. Ножи перекидного рубиль-

ника можно соединять как с верхними, так и с нижними контактами.

По правилам техники безопасности рубильники и переключатели закрываются защитными кожухами.

§ 120. АВТОМАТЫ

Для автоматического выключения и защиты электрических цепей при нарушении нормальных рабочих условий применяют выключатели-автоматы. Они бывают двух видов: максимальные и минимальные.

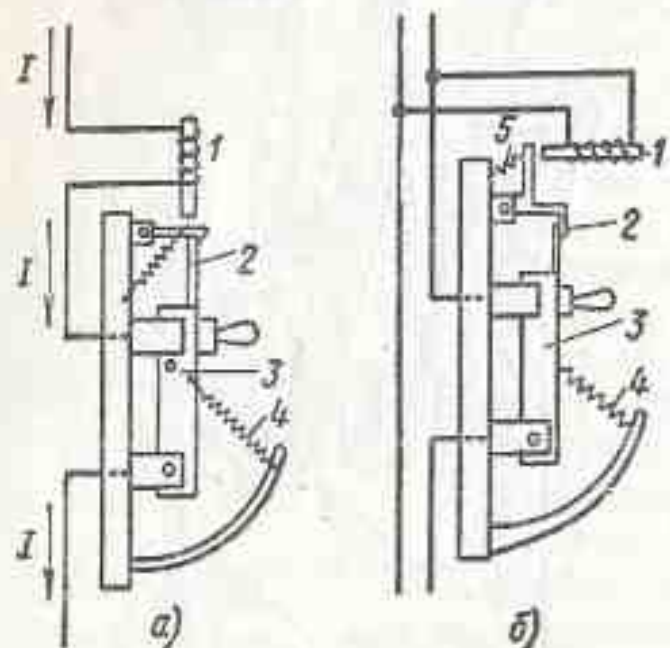


Рис. 160. Устройство автомата:
а — максимального, б — минимального

Автомат, отключающий цепь, когда напряжение в ней становится меньше допустимого, называется минимальным (рис. 160, б).

Когда в цепи автомата проходит ток меньше допустимого, сердечник электромагнита 1 не в состоянии удержать вертикально плечо якоря-защелки. В результате этого пружина 5 оттягивает якорь от сердечника электромагнита, и защелка 2, поднимаясь вверх, освобождает нож выключателя 3, который под действием пружины 4 размыкает цепь, защищаемую автоматом.

Автоматы можно отрегулировать на определенную силу тока, при которой происходит отключение. Большим достоинством автоматов является точность их установки на определенную силу тока, значительно большую, чем при защите цепей плавкими предохранителями.

§ 121. ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

При коротком замыкании, а также при перегрузке сети электрический ток, протекающий по проводам, электрическим машинам и приборам, включенным в цепь, увеличивается и превышает допустимое значение. Провода цепи перегреваются, и их изоляция мо-

жет загореться, а электрические машины и приборы могут выйти из строя.

Для защиты электрических цепей от токов короткого замыкания и длительных перегрузок последовательно с приемниками электрической энергии включают плавкие предохранители. Их работа основана на использовании теплового действия тока.

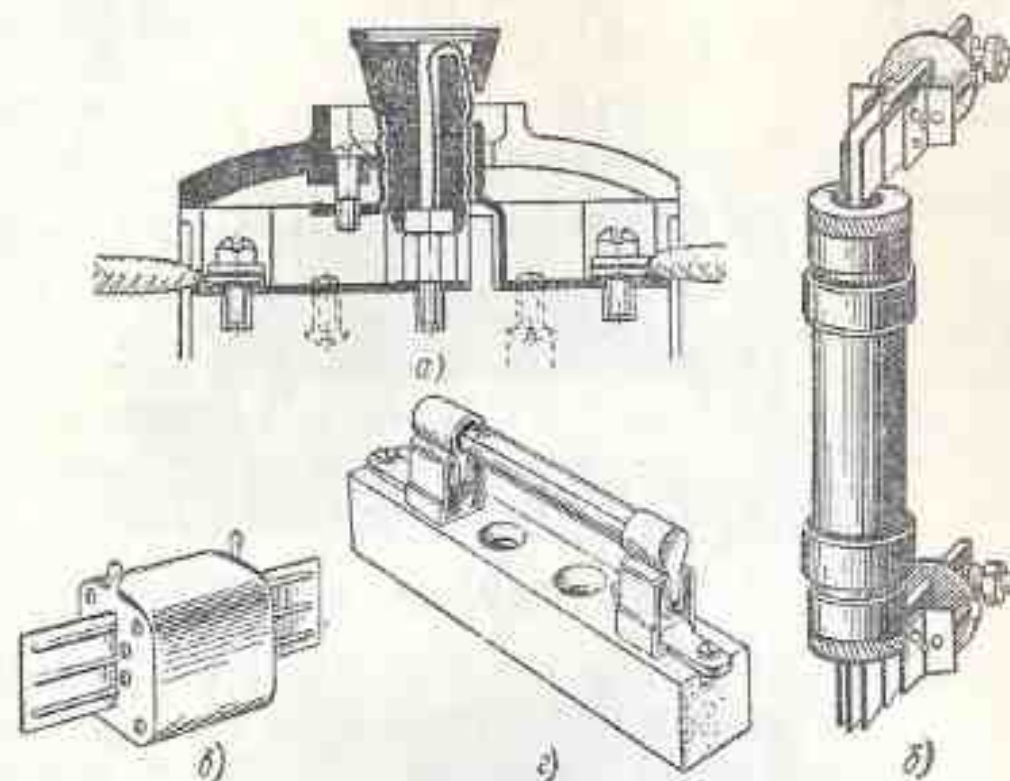


Рис. 161. Предохранители:
а — пробочный, б — трубчатый плавкий ПР, в — плавкий ПН,
г — стеклянный трубчатый

Когда через предохранитель протекает ток, превышающий допустимую величину, то плавкая вставка предохранителя плавится и размыкает цепь, в которую включен предохранитель, раньше, чем перегреются провода и аппаратура. Каждый предохранитель должен неограниченное время выдерживать указанную на нем силу тока. При перемещении этой силы тока плавкая вставка плавится тем быстрее, чем больше перегрузка.

Если в электрической цепи при равномерной нагрузке (без изменений силы тока) рабочая сила тока $I=10$ а, то нельзя в такую цепь включать предохранитель, рассчитанный на меньшую силу тока.

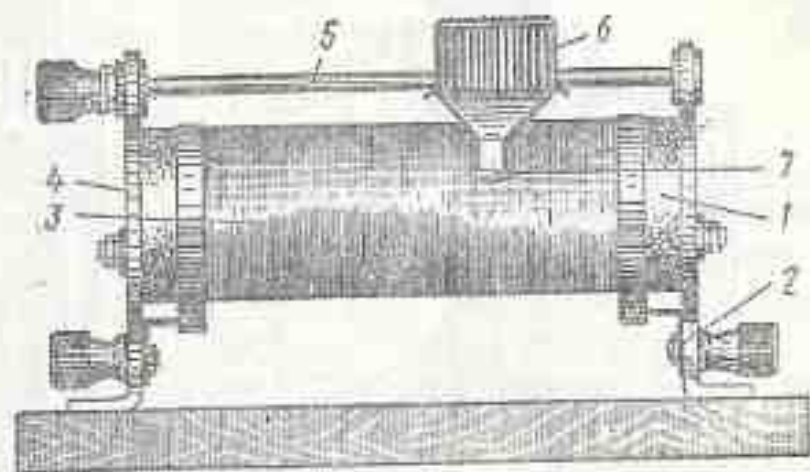
При выборе предохранителя для электрической цепи, в которую будут включать электродвигатели, следует учитывать кратковременную силу пускового тока, превышающую рабочую силу тока примерно в 5—7 раз. По этой причине, чтобы предохранитель не прерывал цепь при каждом пуске двигателя, нужно устанавливать предохранитель на номинальную силу тока, составляющую примерно 40% от пускового тока двигателя. Следует иметь в виду, что выбранный таким путем предохранитель защищает двигатель только

от токов короткого замыкания, но не защищает его от длительной перегрузки. Для такой защиты двигателя служат автоматические выключатели и реле.

На рис. 161 показаны предохранители различных конструкций.

§ 122. РЕОСТАТЫ

Реостаты представляют собой регулируемые резисторы; они служат для пуска, остановки и регулирования скорости электрических двигателей, а также для управления самыми различными электрическими устройствами.



а)

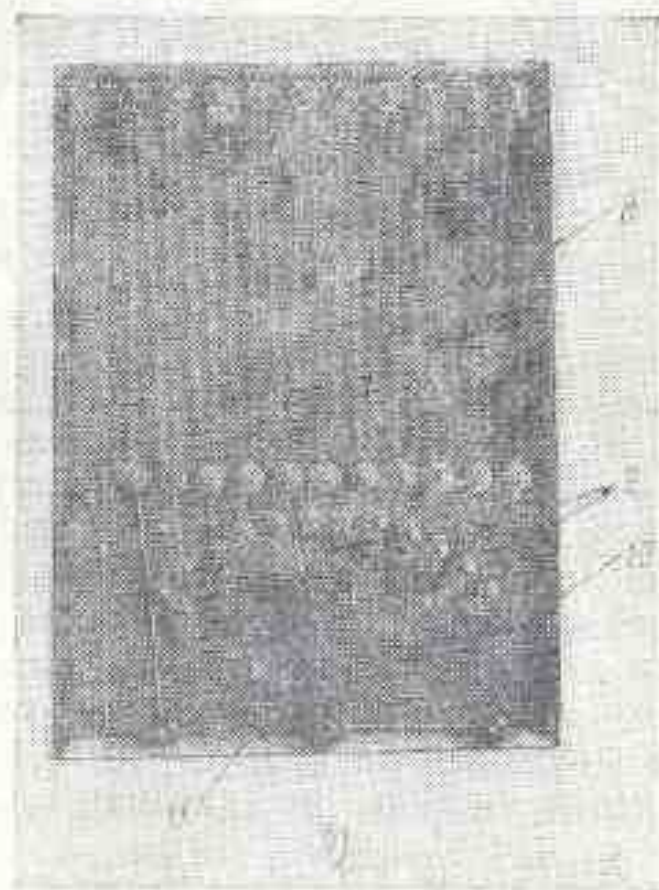


Рис. 162. Реостаты:

а — проволочный, б — рычажный

ских двигателей, а также для управления самыми различными электрическими устройствами.

По конструкции реостаты делятся на металлические и жидкостные, а по роду охлаждения — на воздушные и масляные.

Проволочный реостат (рис. 162, а) имеет фарфоровое основание 1, укрепленное между двумя вертикальными стойками 4. На основание намотана проволока 3, обладающая высоким удельным сопротивлением. Ее концы присоединяются к зажимам 2.

Над проволокой расположен стержень 5, на который надет ползунок 6 с контактными роликами 7, касающимися проволоки. Перемещение движка по проволоке позволяет плавно изменять сопротивление реостата.

Если движок реостата передвинуть влево или вправо, то в цепь будет включена большая или соответственно меньшая часть проволоки реостата и сопротивление изменится.

На каждом реостате обычно указывается его сопротивление и ток, на который он рассчитан.

На рис. 162, б показан внешний вид устройства рычажного реостата. Концы проволочных спиралей — сопротивлений 8 присоединены к медным контактам 9, расположенным на панели 10. По контактам передвигается рычаг 11. При перемещении рычага по контактам реостата его сопротивление изменяется ступенями (скачками).

§ 123. КОНТРОЛЛЕРЫ

Для нескольких переключений, производимых одновременно в электрических цепях при пуске электрических машин, регулировании скорости, изменении направления вращения электродвигателей, применяют контроллеры.

Контроллер (рис. 163) состоит из медных сегментов 1 (отрезков колец), укрепленных на валу 2 из изолирующего материала. Сегменты, являющиеся подвижными контактами, перемещаются при повороте рукоятки 3 вместе с валом.

Кроме подвижных контактов, контроллер имеет неподвижные пружинящие контакты 4, изолированные между собой.

Число сегментов контроллера равно числу его пружинящих контактов, к которым присоединяются провода, идущие от электрических машин, реостатов и других аппаратов, управляемых контроллером.

При повороте вала одни сегменты контроллера замыкаются с неподвижными контактами, а другие размыкаются. Таким путем осуществляются сложные переключения в электрических цепях.

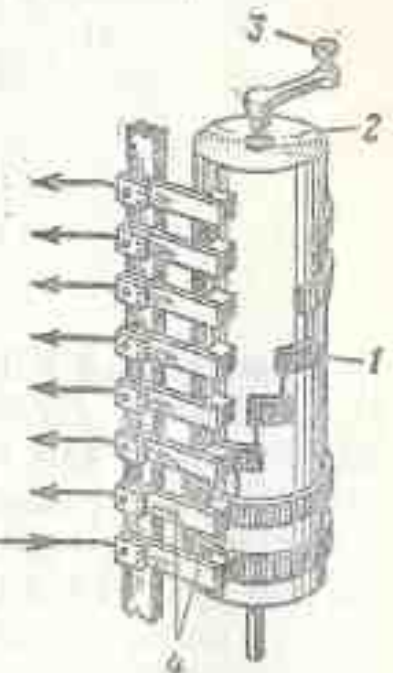


Рис. 163. Устройство контроллера

§ 124. КОНТАКТОР, МАГНИТНЫЙ ПУСКАТЕЛЬ

Контактор. Наиболее распространенным аппаратом для дистанционного замыкания и размыкания электрических цепей является контактор.

В отличие от аппаратов, в которых включение и выключение электрических цепей производят вручную (рубильники), в контакторах эти операции происходят автоматически под действием магнитного поля, возбуждаемого при включении оперативного электрического тока.

Различаются два основных типа контакторов: поворотные и прямоходовые.

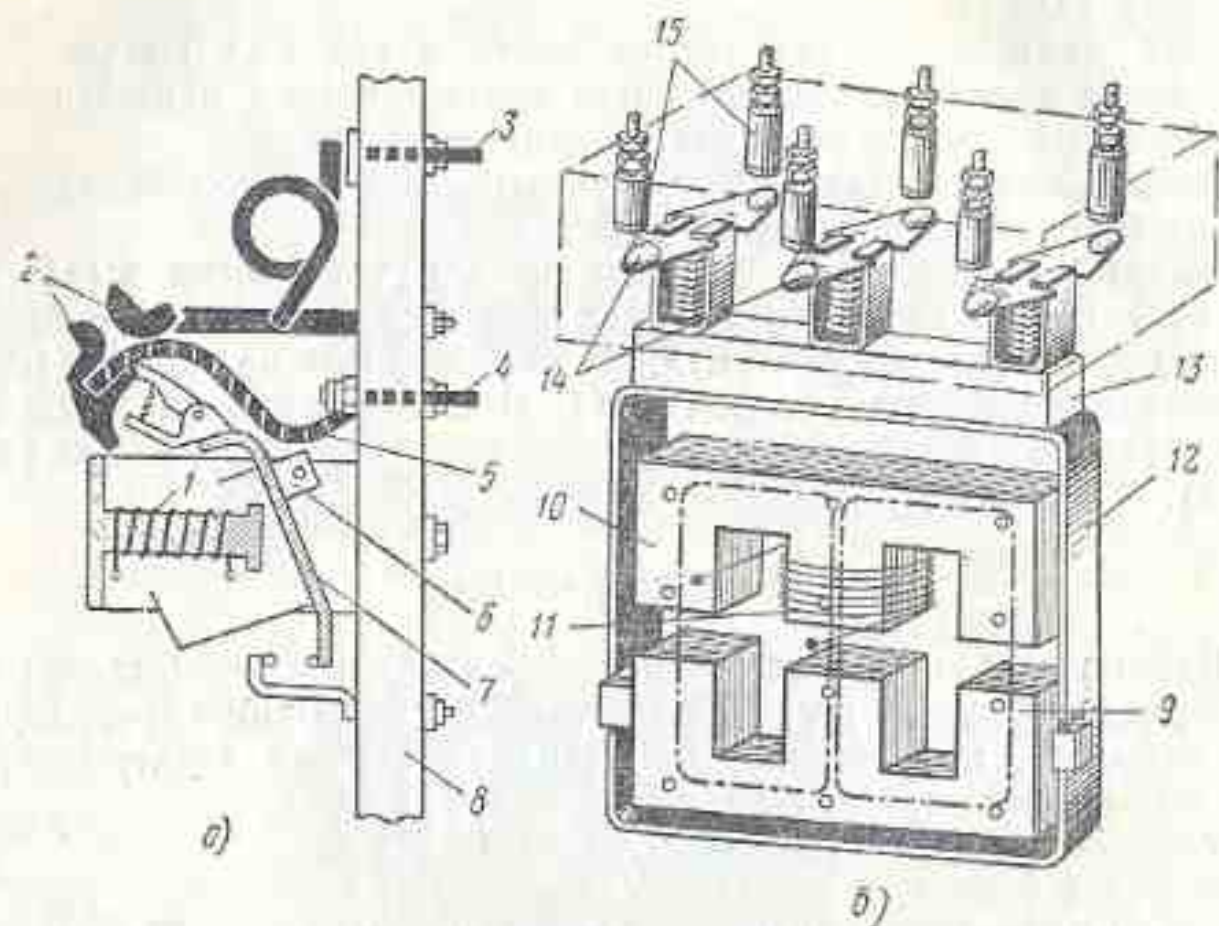


Рис. 164. Устройство контакторов:
а — поворотный, б — прямоходовой

Поворотный контактор (рис. 164, а) состоит из электромагнита 1, якоря 7, расположенного на оси 6, главных контактов 2 и зажимов 3 и 4 для присоединения проводов электросети. Все части контактора укреплены на панели 8.

Когда оперативный ток проходит по обмотке электромагнита контактора, его сердечник намагничивается и притягивает якорь. Якорь, поворачиваясь вокруг своей оси, замыкает главные контакты.

Ток в созданной контактором цепи проходит от зажима 3 через главные контакты 2 и гибкий провод 5 к зажиму 4, а отсюда — в управляемую контактором электрическую машину.

При размыкании цепи электромагнита его сердечник размагничивается и якорь размыкает главные контакты.

В прямоходовом контакторе (рис. 164, б) подвижная часть магнитной системы (якорь) не поворачивается на оси, как в контакторе поворотного типа, а движется прямолинейно.

Контактор состоит из Ш-образного сердечника 10, электромагнита 11, якоря 9, подвижной рамы 12, переключины 13 из изоляционного материала, двойных контактов 14 и неподвижных контактов 15, к которым присоединяются провода электрической цепи.

Когда по обмотке электромагнита прямоходового контактора протекает электрический ток, якорь притягивается к неподвижному сердечнику и поднимается вверх, увлекая за собой подвижную ра-

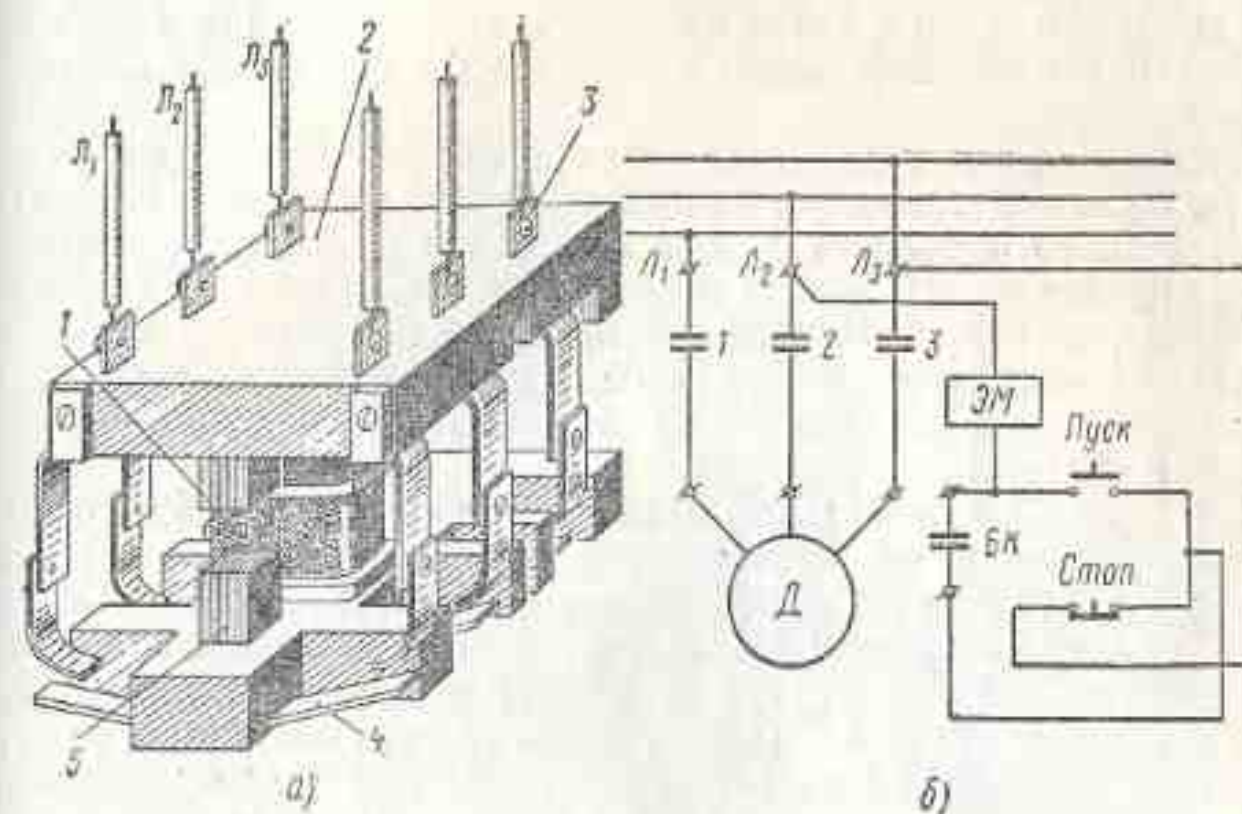


Рис. 165. Магнитный пускатель:
а — общий вид, б — схема включения

му с установленными на переключине двойными контактами, которые плотно прикасаются к двум неподвижным контактам и соединяют их. Происходит замыкание цепи, управляемой контактором.

Контакторы для цепей постоянного тока являются однополюсными, а контакторы трехфазного переменного тока — трехполюсными.

Контакторы широко применяют для управления электрическими установками на заводах и фабриках.

Магнитный пускатель. Дистанционное управление электрическими двигателями трехфазного переменного тока осуществляется при помощи магнитных пускателей — более сложных устройств, в которые входят трехполюсные контакторы.

Магнитный пускатель прямоходового типа (рис. 165, а) имеет электромагнит 1 со стальным сердечником, прикрепленным к верхнему основанию 2. Внизу расположен якорь 5, на котором укрепле-

ны изолированные одна от другой три контактные пластины-перемычки 4. Основание 2 пускателя снабжено контактами 3, к которым присоединяются провода L_1, L_2, L_3 от сети трехфазного переменного тока и провода, идущие от электродвигателя.

При прохождении оперативного электрического тока через обмотку электромагнита возбуждается магнитное поле и якорь притягивается к сердечнику. Контактные пластины-перемычки якоря соединяют между собой контакты, к которым подключены провода от сети трехфазного переменного тока и от электродвигателя. При выключении тока якорь под действием собственного веса опускается и контактные пластины-перемычки отключают двигатель от сети.

Пуск двигателя с помощью магнитного пускателя можно осуществить, включив его по схеме, приведенной на рис. 165, б. Контакты магнитного пускателя 1, 2, 3 нормально разомкнуты. Электромагнит пускателя ЭМ одним концом присоединен к контакту кнопки «Пуск», а другим — к проводу L_2 сети. Контакты кнопки «Стоп» нормально замкнуты, а контакты кнопки «Пуск» разомкнуты. Блок-контакты БК подключены параллельно контактам кнопок «Пуск» и «Стоп».

Для пуска двигателя нажимают кнопку «Пуск». Тогда относительно небольшой оперативный ток пойдет от провода L_2 через обмотку электромагнита ЭМ, замкнутые контакты кнопок «Пуск» и «Стоп» в провод сети L_3 . Якорь магнитного пускателя притянется к сердечнику электромагнита и замкнет главные контакты 1, 2, 3, а также блок-контакт БК. При этом ток от сети поступит в обмотку двигателя и последний начнет работать. Замкнутые блок-контакты, включенные параллельно контактам кнопок «Пуск» и «Стоп», шунтируют кнопку «Пуск», поэтому во время работы двигателя нет необходимости держать эту кнопку в нажатом состоянии. Для остановки двигателя нажимают кнопку «Стоп». При этом размыкается цепь электромагнита пускателя и его якорь приходит в исходное положение. Главные контакты пускателя также размыкаются, и двигатель останавливается.

Пользуясь двумя трехполюсными контакторами, можно включить асинхронный двигатель так, что с их помощью можно производить реверсирование двигателя.

Кнопочная станция реверсивного магнитного пускателя состоит из трех кнопок: «Вперед», «Назад» и «Стоп».

При нажатии кнопки «Вперед» якорь электромагнита одного контактора притянется к сердечнику и замкнет главные контакты пускателя, по которым поступит ток в электродвигатель.

При нажатии кнопки «Стоп» размыкается цепь этого электромагнита, вследствие чего якорь отключает главные контакты и обмотки двигателя от проводов сети.

Для изменения направления вращения двигателя нажимают кнопку «Назад». При этом включается электромагнит второго контактора. Ток от сети поступает в обмотки двигателя через главные контакты второго пускателя.

Тепловым называют реле, реагирующее на изменение температуры (термореле). Действие термореле основано на расширении металла при его нагревании.

Широкое распространение получили биметаллические тепловые реле. Рабочая часть такого реле представляет собой биметаллическую пластину, состоящую из двух металлов с разными температурными коэффициентами линейного расширения. Материалы для пластинок выбирают так, чтобы они имели возможно большую разность коэффициентов расширения, например медь — сталь, сталь — никель, инвар — латунь.

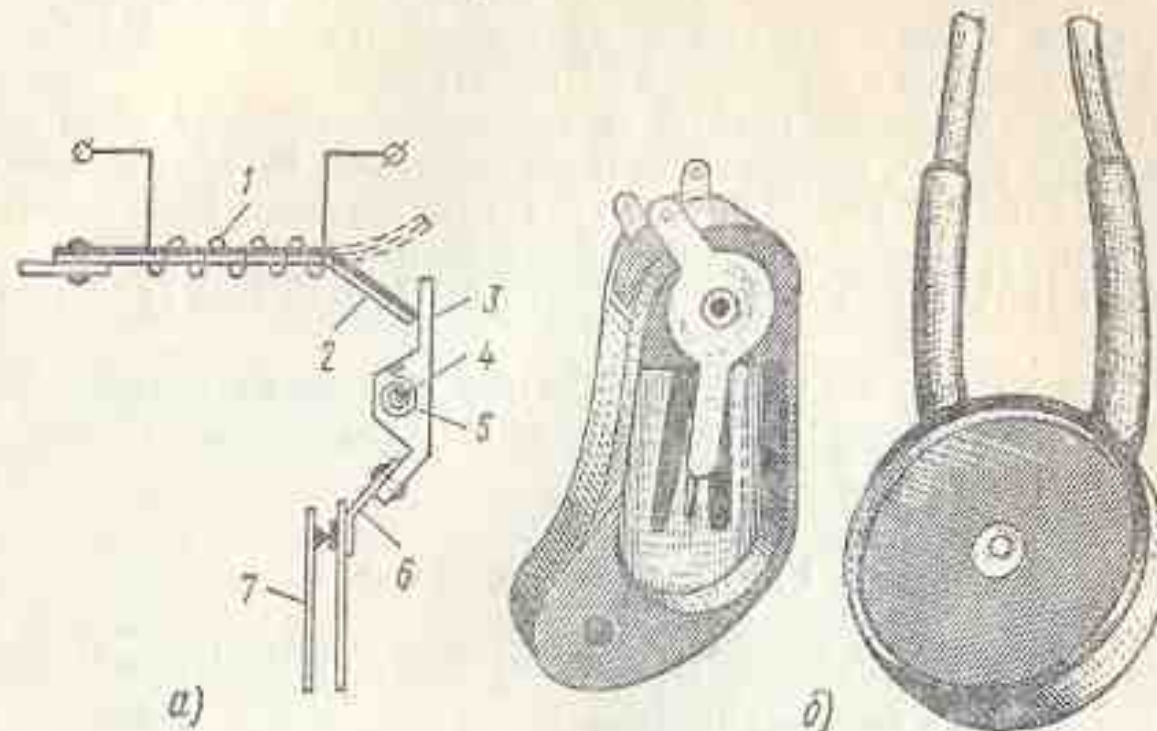


Рис. 166. Реле:
а — тепловое, б — температурно-токовое

Для защиты электрических двигателей при токовых перегрузках применяют тепловое максимальное реле (рис. 166). Электроподогреватель 1 теплового реле является воспринимающей частью. Биметаллическая пластинка 2 используется как промежуточная часть, а исполнительной частью служат контакты 7. Подогреватель включается последовательно в цепь двигателя, а контакты — в цепь электромагнита пускателя, производящего пуск двигателя.

При нормальной нагрузке биметаллическая пластинка изогнута. При этом рычаг 3 верхним плечом упирается в пластинку 2, а нижнее его плечо замыкает контакты 7 реле.

Когда ток в подогревателе превышает допустимую величину, биметаллическая пластинка 2 изгибается в сторону металла с меньшим коэффициентом теплового расширения, т. е. вверх. Тогда верхнее плечо рычага 3 под действием пружины 5 поворачивается на оси 4 влево, нижнее плечо — вправо, а контакты реле размыкают цепь, в которую они включены.

Для приведения реле в рабочее положение нажимают кнопку и при этом отросток *б* рычага *з* идет влево, а его верхнее плечо отходит вправо и устанавливается так, как показано на рис. 166, *а*.

На рис. 166, *б* изображено температурно-токовое реле типа ТТ-1, предназначенное для защиты от перегревов обмоток асинхронных однофазных короткозамкнутых электродвигателей мощностью до 600 вт, напряжением 127 и 220 в.

Реле имеет биметаллический элемент, который при нагреве до определенной температуры скачкообразно меняет направление своего выгиба, а при охлаждении также скачкообразно возвращается в исходное положение.

Реле монтируется непосредственно на двигателе. Его контакты включаются в цепь питания двигателя. В эту же цепь последовательно включается нихромовый нагреватель.

При перегрузке двигателя, под влиянием нагрева нихромового нагревателя током, протекающим по обмоткам двигателя, биметаллический элемент реле срабатывает и отключает цепь двигателя.

Температура срабатывания биметаллического элемента реле примерно 120°. Температура возврата около 80°. Вес реле не более 12 г.

Такими тепловыми реле снабжаются магнитные пускатели, масляные манометры, термометры системы охлаждения автомобилей и многие другие устройства.

Контрольные вопросы

1. Для каких целей используется электрическая аппаратура управления и защиты?
2. Как устроен и действует рубильник?
3. Расскажите об устройстве и действии электромагнитного выключателя-автомата.
4. Для чего служат плавкие предохранители?
5. Когда применяют регулируемые резисторы-реостаты?
6. Как устроен и для чего служит контроллер?
7. Расскажите об устройстве и действии контактора.
8. Каковы устройство и работа теплового реле?

ГЛАВА XII

ПРОИЗВОДСТВО, ПЕРЕДАЧА И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

§ 126. ПРОИЗВОДСТВО И ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В зависимости от вида преобразуемой энергии (механической, световой, химической и т. д.) электростанции делятся на тепловые, гидравлические, атомные, ветряные, солнечные и др.

На тепловых электростанциях в электрическую энергию преобразуется энергия топлива. Эти электростанции производят основную часть вырабатываемой электроэнергии. Тепловые электростанции разделяются на две группы: конденсационные и теплофикационные или теплоцентрали (ТЭЦ).

Конденсационные станции снабжают потребителей только электрической энергией. Их сооружают вблизи залежей местного топлива с тем, чтобы не возить его на большие расстояния.

Теплоцентрали снабжают потребителей не только электрической энергией, но и теплом — водяным паром или горячей водой, которая по трубам передается потребителям. Поэтому ТЭЦ сооружают поблизости от приемников теплоты, в центрах промышленных районов и крупных городов для уменьшения протяженности теплофикационных сетей. Топливо транспортируют на ТЭЦ из мест его добычи.

Основными двигателями на тепловых электростанциях служат паровые турбины. В турбину поступает пар из котла и приводит ротор ее во вращение. Энергия движения паровой турбины преобразуется в электрическую генератором, вал которого непосредственно соединен с валом турбины.

Гидроэлектростанции (ГЭС) сооружают поблизости от рек. Вода вращает ротор гидротурбины и вал генератора, соединенный с валом турбины. В генераторе механическая энергия гидротурбины преобразуется в электрическую.

Производство электрической энергии на ГЭС проще и дешевле, чем на тепловых электростанциях, так как не нужно топливо и для обслуживания требуется меньшее количество обслуживающего персонала. Однако сооружение ГЭС значительно дороже сооружения теплоэлектростанции и требует большего времени вследствие

большого объема земляных и строительных работ. Поэтому с целью экономии времени в нашей стране предусматривается преимущественное строительство тепловых электростанций, работающих на природном газе, мазуте и дешевом угле.

В атомных электростанциях первичной энергией является энергия ядер атомов. Советские ученые и инженеры успешно работают над проблемой использования атомной энергии в мирных целях. Уже в 1954 г. в СССР вступила в строй первая в мире промышленная атомная электростанция.

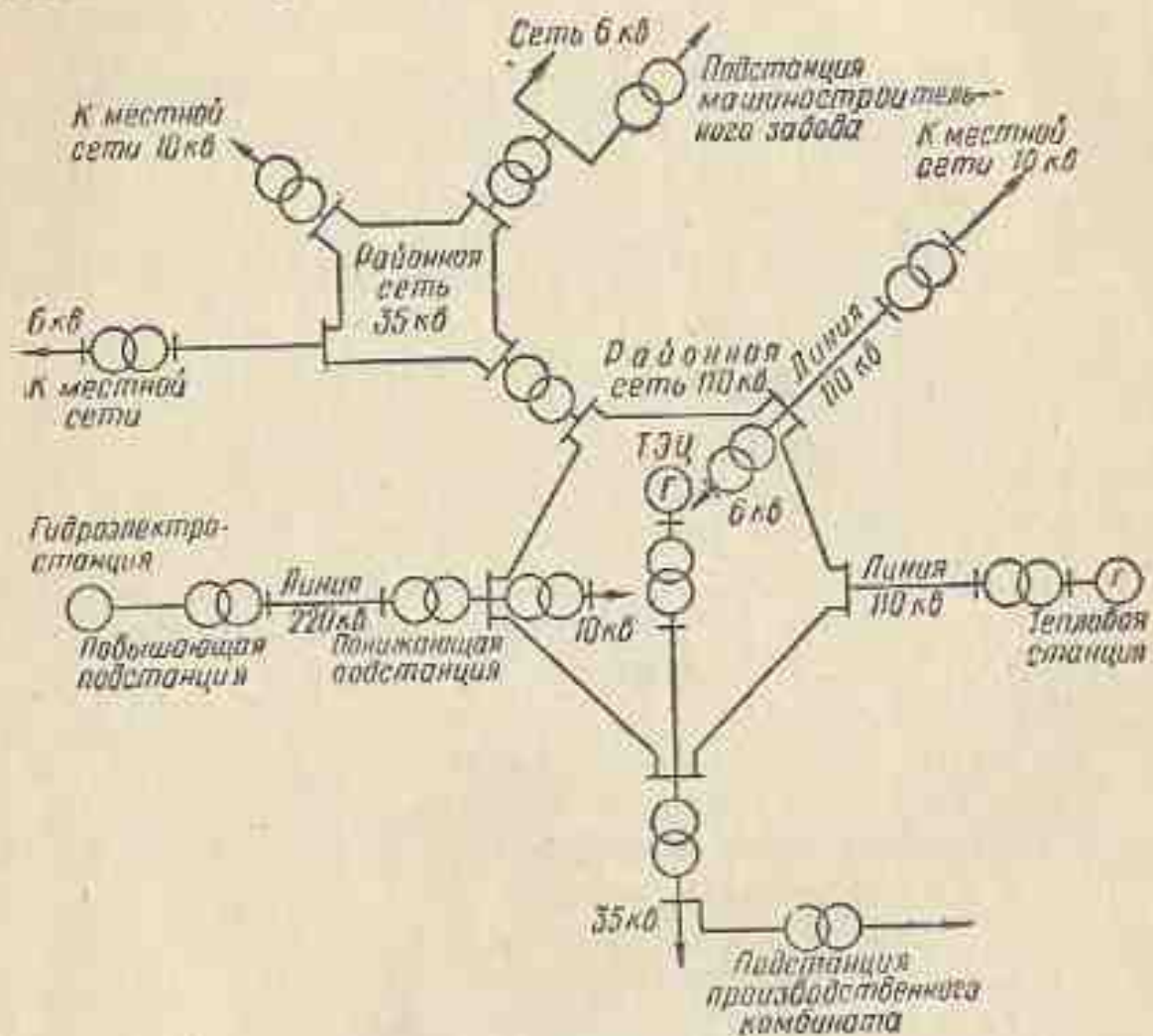


Рис. 167. Схема энергосистемы

На атомных электростанциях в специальном устройстве, называемом атомным реактором, происходит процесс расщепления атомов урана, при котором выделяется большое количество теплоты. За счет этой теплоты из воды образуется пар, поступающий в турбину. Отработавший пар направляется в конденсатор так же, как на обычных тепловых конденсационных электростанциях.

Ветровые электростанции преобразуют энергию ветра в электрическую энергию с помощью ветроколеса. На электростанциях, преобразующих энергию солнца в электрическую энергию, специальные устройства нагревают воду, при этом образуется пар, который, как и в тепловых станциях, направляется в турбину.

Электростанции разделяются на районные станции и станции местного значения.

Районные станции имеют большие мощности (сотни тысяч киловатт и более) и снабжают электроэнергией крупные районы. Они соединяются с потребителями линиями электропередач высокого напряжения (110, 220, 400, 500, 750 кВ и более).

Электростанции местного значения предназначены для снабжения энергией потребителей, расположенных недалеко от станции.

Крупные электростанции, находящиеся в различных пунктах района, включаются параллельно — объединяются в энергосистему. В энергосистему входят электростанции, электрические и тепловые сети и потребители энергии.

Объединение электростанций в единую энергосистему повышает надежность и бесперебойность электроснабжения потребителей энергии, а также повышает использование мощности электростанции.

На рис. 167 изображена примерная схема энергосистемы. Районная сеть 110 кВ получает электроэнергию от гидроэлектростанции через повысительную подстанцию, линию электропередачи 220 кВ и понизительную подстанцию. Эта сеть снабжается энергией также через линию электропередачи 110 кВ и повысительную подстанцию от тепловой электростанции конденсационного типа, расположенной в районе залегания местного топлива (торфа, угля и т. д.).

Внутри кольцевой районной сети имеются понизительные подстанции, обслуживающие большой промышленный район. В центре этого района размещается теплоцентраль (ТЭЦ), работающая на привозном топливе и снабжающая потребителей электрической и тепловой энергией. Для связи с сетью ТЭЦ имеет повысительную подстанцию.

От районной сети 110 кВ через понизительную подстанцию питается районная сеть 35 кВ, от которой, в свою очередь, через понизительные подстанции питаются местные сети 10 или 6 кВ с понижающими трансформаторами для распределительных сетей 380/220 в.

Крупные промышленные предприятия могут получать электроэнергию как от местной, так и от районной сети 35 кВ.

§ 127. ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПОДСТАНЦИИ

Подстанцией называется электроустановка, предназначенная для преобразования или распределения электрической энергии. Подстанции могут быть преобразовательными и распределительными. Преобразовательными могут быть подстанции трансформаторные, двигатель-генераторные, выпрямительные и т. д. Всякая подстанция состоит из преобразователей энергии (трансформаторов, двигатель-генераторов, выпрямителей и т. д.), распределительных устройств и вспомогательных элементов.

По назначению трансформаторные подстанции разделяются на главные понизительные подстанции (ГПП), центральные распределительные подстанции (ЦРП), распределительные пункты (РП).

цеховые трансформаторные подстанции или трансформаторные пункты (ТП) и специальные подстанции, например, преобразовательные (ПП). Подстанции ГПП потребляют электроэнергию от электростанции или энергосистемы и, понижая напряжение, распределяют ее по территории предприятия или района. Подстанции ЦРП также распределяют электроэнергию между потребителями, но при неизменном напряжении (без трансформации). Распределительные пункты (РП) осуществляют распределение электроэнергии между потребителями без изменения напряжения. Трансформаторные пункты (ТП) принимают электроэнергию при высоком напряжении (6, 10, 35 кВ) от РП (или ЦРП) и распределяют ее между отдельными предприятиями или нагрузками при напряжении 500, 380, 220 в.

В зависимости от конструкции трансформаторные подстанции могут быть закрытыми и открытыми. Закрытые подстанции строятся в специальных зданиях. Для таких подстанций высшее напряжение 6—10 кВ (сюда относятся ЦРП, РП, ТП). Открытые подстанции сооружаются вне здания. Высшее напряжение такой подстанции 35 кВ и выше (например, ГПП).

По расположению на территории предприятия трансформаторные подстанции разделяются на отдельностоящие (обычно ГПП и ЦРП), пристроенные к зданию, когда устройства высшего напряжения находятся снаружи, а низшего напряжения — внутри здания, и внутренние, полностью расположенные внутри здания. Если оборудование подстанции находится внутри технологического помещения и доступ к этому оборудованию возможен из того же помещения, то подстанция называется внутрицеховой.

Трансформаторная подстанция, установленная на открытом воздухе, все оборудование которой находится на недоступной высоте, называется мачтовой. В таких подстанциях для установки оборудования используют мачты или различные конструкции из стали, железобетона и дерева.

Подстанция, полностью собранная на предприятии и состоящая из трансформаторов с защищенными от прикосновения токоведущими частями, комплексного распределительного устройства и вспомогательного оборудования, называется комплектной трансформаторной подстанцией (сокращенно КТП). Эти подстанции предназначены и для наружной и для внутренней установок. При наружной установке КТП помещается на бетонной подушке высотой 1,5 м от уровня земли и состоит из двух основных частей — силового трансформатора и распределительного устройства с кварцевыми предохранителями. Подстанции для внутренней установки снабжаются воздушными автоматами и разъединителями.

Распределительное устройство (сокращенно РУ) представляет собой электрическую установку, предназначенную для приема и распределения электрической энергии. РУ содержит коммутационные, измерительные и защитные аппараты, соединительные шины и вспомогательное оборудование. Открытыми РУ называются такие, оборудование которых расположено на открытом воздухе. Если

оборудование РУ расположено в помещении, то РУ называется закрытым.

РУ называется комплектным (сокращенно КРУ), если оно собрано на заводе и состоит из закрытых шкафов с встроенными в них аппаратами, шинами и вспомогательным оборудованием. КРУ изготавливают на стандартные напряжения 3, 6, 10 и 35 кВ для установки как в закрытых помещениях, так и на открытом воздухе.

РУ напряжением до 1000 в, оборудование которого смонтировано на панелях, установленных на общем каркасе, называется распределительным щитом.

Если по условиям эксплуатации какое-нибудь оборудование РУ должно быть отделено от остального оборудования, то оно устанавливается в специальном, предназначенном для этого оборудовании помещении, называемом камерой. Камера, ограниченная со всех сторон стенами и перекрытиями и имеющая сплошные (не сетчатые) двери, называется закрытой. Открытой называется камера, имеющая проемы, защищенные полностью или частично несплошными (сетчатыми) ограждениями.

Закрытая камера, предназначенная для установки маслonaполненных аппаратов и имеющая выход наружу или в специальный взрывной коридор, называется взрывной.

§ 128. ОБОРУДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

В состав оборудования трансформаторных подстанций входят: силовые трансформаторы, аппаратура защиты и коммутации, шинные устройства, измерительные трансформаторы и устройства автоматического контроля и управления.

Прием электрической энергии и дальнейшее распределение ее на подстанциях и в распределительных устройствах осуществляется посредством главных шин. Шины укрепляются с помощью крепежных деталей на фарфоровых изоляторах. Шины для закрытых распределительных устройств (ЗРУ) 6—10 кВ представляют собой голые, обычно алюминиевые (реже медные) полосы прямоугольного поперечного сечения. Для распознавания отдельных фаз (и защиты шин от коррозии) их окрашивают в различные цвета: фаза А — в желтый, фаза В — в зеленый, фаза С — в красный цвет.

Электрические линии присоединяют к главным шинам с помощью специальной аппаратуры (выключатели, разъединители и т. д.). Все электрические соединения подстанций и распределительных устройств обычно изображают в виде однолинейных схем, на которых условными обозначениями показывают основные элементы установки (выключатели, предохранители и т. д.).

Измерительные трансформаторы применяют для включения измерительных приборов и обмоток реле защиты и управления.

К аппаратам защиты и коммутации, устанавливаемым на подстанциях, относятся выключатели мощности, выключатели нагрузки, разъединители, предохранители, разрядники и реакторы.

На рис. 168 изображена однолинейная схема трансформаторной подстанции небольшой мощности (не более 320 кв), а на рис. 169 — однолинейная схема трансформаторной подстанции большой мощности.

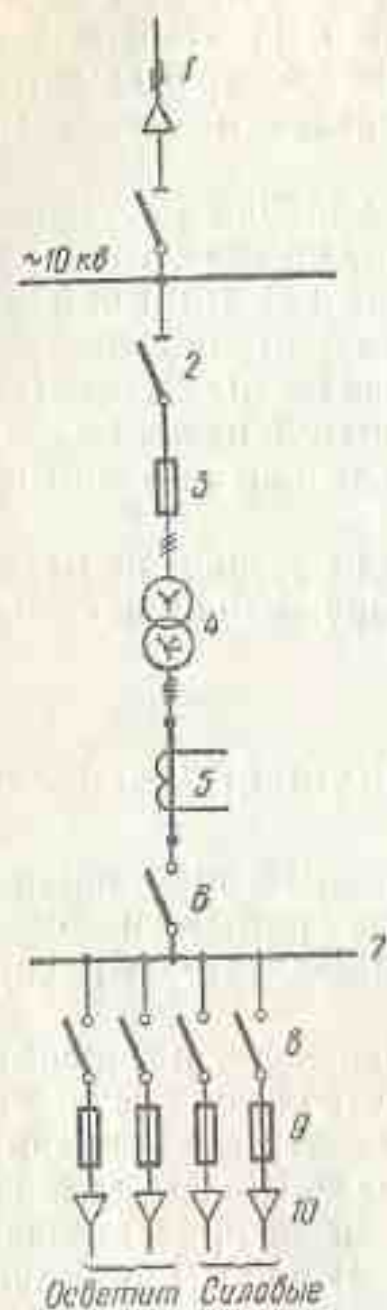


Рис. 168. Схема трансформаторной подстанции небольшой мощности:

1 — высоковольтный кабель, 2 — разъединитель, 3 — плавкие предохранители высокого напряжения, 4 — силовой трансформатор, 5 — трансформатор тока, 6 — рубильник или выключатель нагрузки, 7 — сборные шины низкого напряжения, 8 — рубильник, 9 — плавкие предохранители низкого напряжения, 10 — кабели к нагрузкам

Масляные выключатели мощности предназначены для включения и выключения различных электроустройств высокого напряжения переменного тока (генераторов, двигателей, трансформаторов)

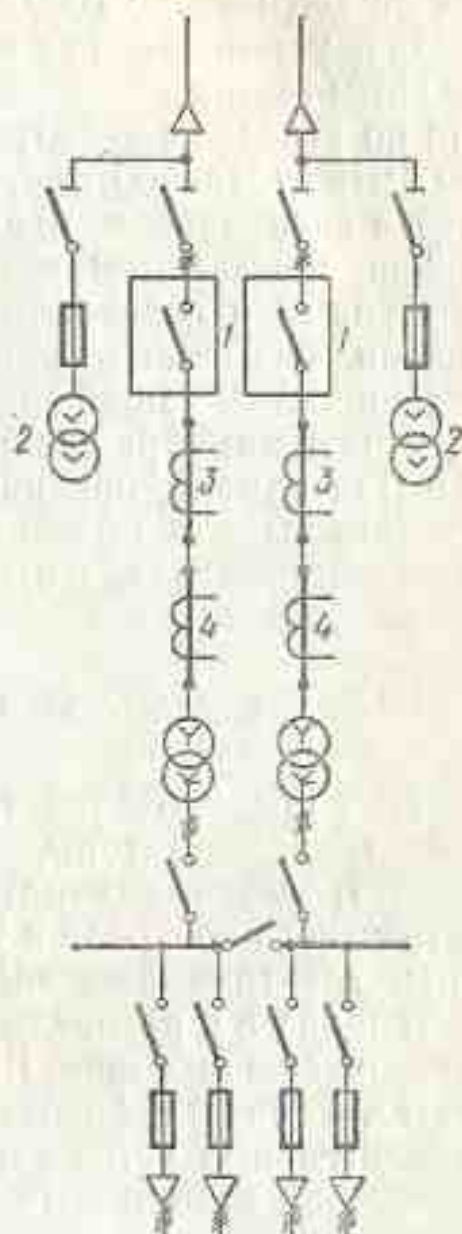


Рис. 169. Схема трансформаторной подстанции большой мощности:

1 — масляные выключатели, 2 — трансформаторы напряжения, 3 и 4 — трансформаторы тока

при нормальной эксплуатации, а также и для отключения их при перегрузке или коротких замыканиях.

Масляные выключатели по своей конструкции делятся на две основные группы: баковые выключатели с большим объемом масла, которое является дугогасящей и изолирующей средой, и горшковы выключатели с малым объемом масла, которое используется для гашения дуги.

На рис. 170 показан схематический разрез бакового масляного выключателя с большим объемом масла и без специального устройства для гашения дуги. Выключатель состоит из металлического бака 1, заполненного маслом, и устройства для разрыва цепи тока. На стенке бака имеется указатель уровня масла. Сверху бак закрыт металлической крышкой 2, в которой имеется газоотводная трубка и закреплены проходные изоляторы 3 (штулки). Внутри втулок помещены токоведущие стержни 4, соединенные с неподвижными контактами 5. Подвижные контакты 6 укреплены на изоляционной планке 7, жестко связанной с вертикальной штангой 8. Штанга с подвижной контактной системой под действием пружины 9, помещенной в верхней части выключателя, стремится разомкнуть контакты, но в нормальных условиях удерживается электромеханической защелкой 10.

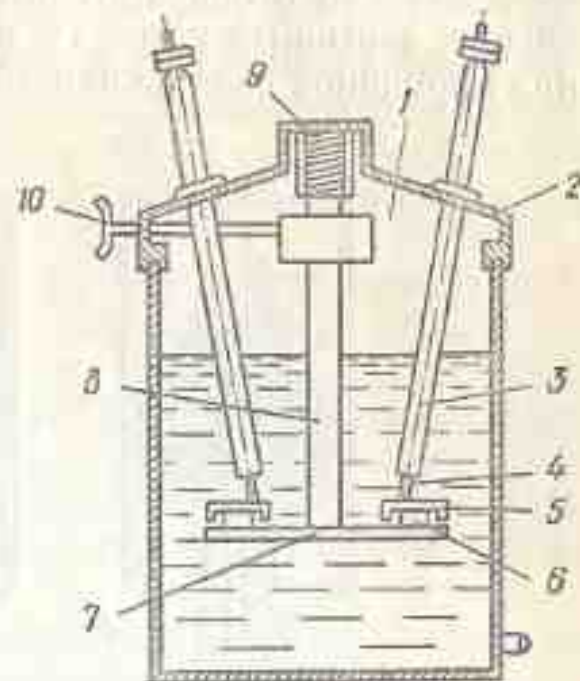


Рис. 170. Устройство бакового масляного выключателя

При размыкании подвижных и неподвижных контактов между ними возникает электрическая дуга, так как накопленная в цепи электрическая энергия не может мгновенно исчезнуть и стремится поддержать ток, проходящий через дугу, состоящую из раскаленных газов. Под действием высокой температуры ближайшие слои масла испаряются и разлагаются на составные части, вследствие чего дуга оказывается окруженной газовой средой (газовым пузырем) — водородом, который обладает высокой теплоемкостью и диэлектрической прочностью. Это облегчает гашение дуги.

После гашения дуги в масле остаются раскаленные газы, которые поднимаются вверх через весь слой масла, охлаждаясь на своем пути и собираясь под крышкой выключателя в специально оставленном незаполненном маслом буферном пространстве, сообщаемом с воздухом через газоотводную трубку. Большая часть газов состоит из водорода, который с кислородом воздуха образует гремучую смесь.

Если водород, проходя через слой масла, недостаточно охлаждается, то гремучая смесь может взорваться, что поведет к разрушению выключателя, загоранию масла и может быть причиной пожа-

ра. Поэтому слой масла над контактами должен быть достаточно большим. Однако наполнение маслом выключателя сверх установленной нормы также недопустимо, так как при этом уменьшается буферное пространство, что может, в свою очередь, вызвать взрыв выключателя расширяющимися газами.

Учитывая возможность взрывов при эксплуатации, масляные выключатели с большим объемом масла устанавливают в специальных взрывных камерах, представляющих собой железобетонное или кирпичное изолированное помещение.

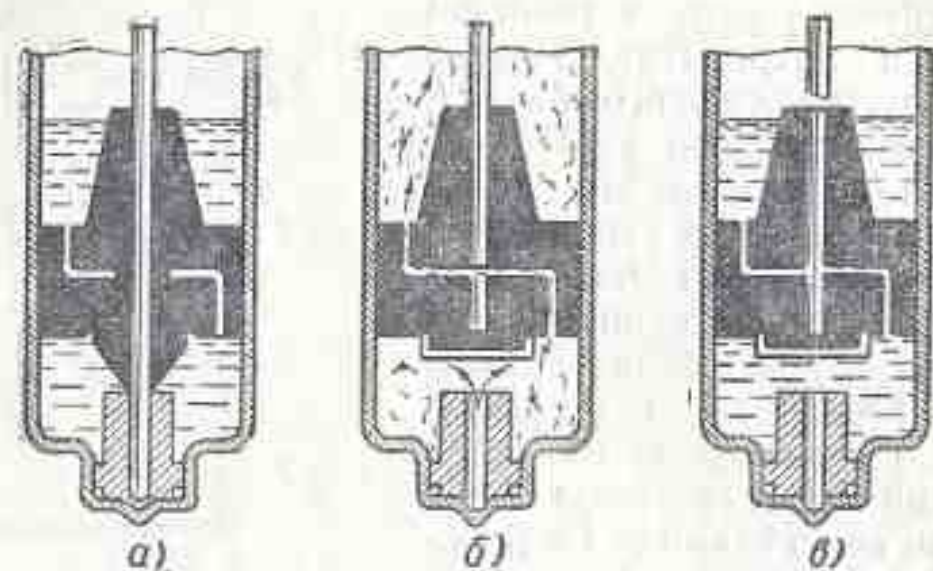


Рис. 171. Схема масляного выключателя горшковой типа:
а — в положении «включен», б — процесс отключения, в — в положении «выключен»

Горшковые выключатели (рис. 171) с малым объемом масла безопасны в отношении взрывов и пожаров вследствие большой прочности цилиндров и малого объема масла. Поэтому они не требуют специальных изолированных помещений для своей установки.

Контактами является подвижный стержень и неподвижный контакт розеточного типа, находящийся в нижней части горшка.

При включении подвижный стержень, проходя через центральное отверстие, отжимает две латунные заслонки, находящиеся под давлением пружины. При выключении латунные заслонки закрывают отверстие, через которое проходит подвижный контакт.

При отключении между подвижным и неподвижным контактами образуется дуга. Под влиянием высокой температуры дуга окружена газовой средой, вследствие чего резко повышается давление в нижней части горшка. Поэтому поток масла устремляется через поперечный канал гасительной камеры в верхнюю часть горшка и гасит дугу.

Основными величинами, характеризующими масляный выключатель, являются номинальное напряжение и ток, предельный отключаемый ток и предельная отключаемая мощность.

Выключатели нагрузки предназначены для выключения и отключения электрических цепей только в условиях нормального режима работы.

Дугогасительным устройством выключателя нагрузки является пластмассовая разъемная камера с вкладышем из органического стекла, внутри которого перемещается подвижной нож дугогасительной системы выключателя. В нижней части камеры находится неподвижный нож дугогасительной системы.

При отключении расходятся сначала рабочие контакты, а затем контакты дугогасительной системы, между которыми возникает дуга. Под действием высокой температуры из стенок вкладыша выделяются газы (в основном водород), создающие дутье, гасящее дугу.

Выключатели нагрузки снабжаются плавкими предохранителями, защищающими цепь от перегрузок и коротких замыканий.

Для защиты силовых цепей до 35 кВ устанавливают плавкие предохранители ПК (с кварцевым заполнением). Такой предохранитель представляет собой фарфоровую трубку, внутри которой помещены плавкие вставки. Трубка засыпается кварцевым песком, способствующим гашению дуги, возникающей при перегорании предохранителя.

Разъединители применяют в установках высокого напряжения для тех или иных отключений и переключений в находящейся под напряжением цепи. Например, после выключения масляного выключателя его отключают от линии с помощью разъединителей для производства нужного ремонта.

По своему устройству разъединитель подобен рубильнику. Следует иметь в виду, что выключение разъединителя под нагрузкой ни в коем случае недопустимо, так как на ножках разъединителя при отключении его под током появляется устойчивая дуга, которая может послужить причиной тяжелых аварий.

В выключенном положении контакты разъединителя имеют расстояние, достаточное для того, чтобы не произошло пробоя.

Реакторы служат для ограничения токов коротких замыканий. Реактор представляет собой индуктивную катушку, не имеющую стального сердечника и состоящую из нескольких витков изолированной медной проволоки большого поперечного сечения. Реакторы имеют большое индуктивное и малое активное сопротивление.

В результате уменьшения величины токов короткого замыкания при помощи реакторов оказывается возможным устанавливать на станциях и подстанциях более дешевую и простую аппаратуру, рассчитанную на меньшие токи короткого замыкания, применять кабели и шины меньшего сечения. Это значительно снижает стоимость распределительного устройства и повышает надежность его работы.

Разрядник представляет собой аппарат, предназначенный для защиты электротехнических устройств от перенапряжений. Перенапряжениями называются повышения напряжения сверх номинального, достигающие величины, опасных для целостности изоляции.

Такое повышение напряжения создается электромагнитными процессами, связанными с грозовыми разрядами, или процессами, сопутствующими включениям, выключениям, коротким замыканиям между фазами и т. п.

Разрядник включают между проводом и землей; он служит для соединения с землей провода, в котором возникло перенапряжение. Основной частью разрядника является искровой промежуток, в котором при перенапряжении возникает электрическая дуга. По окончании перенапряжения дуга гаснет, и разрядник вновь не проводит тока.

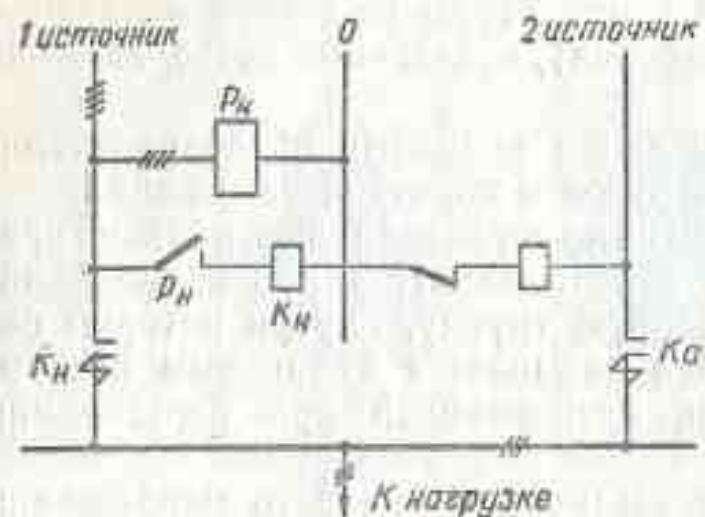


Рис. 172. Схема АВР

Последовательно с разрядниками включают сопротивление для уменьшения тока через разрядник и для гашения дуги при снижении напряжения до номинального.

Простейшим разрядником служат два электрода, выполненные в виде рогов, разделенные промежутком. Более совершенным является разрядник с применением нелинейных сопротивлений (например, тиритовый).

В электроустановках промышленных предприятий широко используют резервирование электроснабжения путем переключения питания потребителей с поврежденного на исправно действующий ввод. Для этого предприятие должно быть обеспечено двумя вводами от двух независимых источников электроэнергии, т. е. применяют автоматическое включение резерва АВР на стороне низкого напряжения.

АВР может устанавливаться при наличии как двух высоковольтных или низковольтных вводов, так и при одном высоковольтном и одном низковольтном вводе.

Принципиальная схема АВР изображена на рис. 172. При наличии напряжения на первом вводе срабатывает реле напряжения P_n , включив своими нормально открытыми контактами катушку электромагнита привода контактора нормальной работы K_n . Одновременно разомкнутся нормально закрытые контакты реле P_n в цепи катушки контактора аварийного питания K_a . Таким образом, контактор K_n будет включен, а K_a — выключен, и электроснабжение предприятия будет осуществляться от 1-го ввода.

При прекращении подачи энергии по первому вводу (или при значительном снижении напряжения) реле P_n отпускает свои контакты в исходное положение, в результате чего контактор K_n отключается, а K_a включается, так что нагрузка получает электроэнергию от второго ввода. При восстановлении напряжения на первом вводе АВР переключает нагрузку вновь на первый ввод.

§ 129. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Нарушение нормальной работы электроустановки в большинстве случаев приводит к коротким замыканиям, которые могут возникать из-за пробоя изоляции, обрывов проводов, ошибочных действий обслуживающего персонала и т. д. Как короткие замыкания, так и длительные перегрузки приводят к чрезмерному нагреву токоведущих частей и разрушению изоляции кабелей и обмоток машин и аппаратов. Для предупреждения распространения аварии поврежденный участок электроустановки должен быть автоматически отключен от сети.

При аварийных режимах в электроустановках с напряжением выше 1000 в отключение производится при помощи реле.

Релейной защитой называется устройство, состоящее из одного или нескольких реле, соединенных между собой по определенной схеме (рис. 173). При увеличении тока в линии 1 при коротком замыкании или перегрузке увеличится ток как во вторичной обмотке трансформатора тока 2, так и в обмотке реле 3. Вследствие этого сердечник этого реле втягивается в катушку и замыкает контакты, после чего включается обмотка реле 4, при срабатывании которого получит питание отключающая катушка привода выключателя 6 и обмотка реле 5, которое включает сигнализацию (звуковую и световую). После отключения выключателя цепь катушки 6 разомкнется и реле 3 и 4 вернутся в исходное положение. Контакты реле 5 останутся включенными (их возврат выполняется от руки, так как нет противодействующей пружины). В этой схеме основным реле является реле 3.

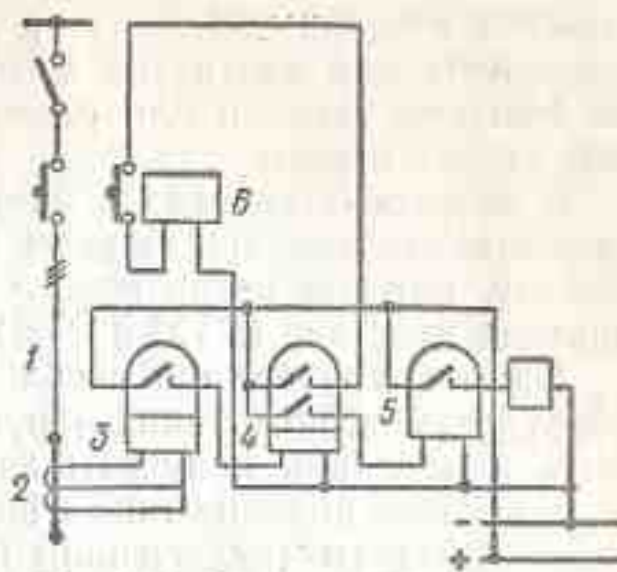


Рис. 173. Схема релейной защиты

В качестве основных реле наиболее широко используют максимальные токовые реле, которые реагируют на увеличение тока в защищаемой цепи. Эти реле подразделяются на реле прямого действия (непосредственно воздействуют на отключающий механизм привода выключателя) и на реле косвенного действия (воздействуют на отключающий механизм привода выключателя посредством других реле и устройств).

Реле прямого действия встраивают в привод выключателя. Оно может быть мгновенного действия и с выдержкой времени. Принцип действия реле РТМ (реле токовое мгновенного действия) основан на электромагнитных свойствах соленоида. Если по обмотке реле протекает ток, равный или больший тока срабатывания, то сердечник втягивается внутрь соленоида и размыкает контакты выключателя. После отключения линии тока в обмотке реле нет и сердечник возвращается в исходное положение.

Реле РТВ (реле токовое с выдержкой времени) отличается от реле РТМ тем, что его конструкция дополнена часовым механизмом, препятствующим мгновенному перемещению исполнительного органа реле.

В качестве реле косвенного действия наиболее широкое распространение имеют реле ЭТ (электромагнитное токовое) и ИТ (индукционное токовое).

Вспомогательные реле защиты (реле времени, промежуточные и сигнальные реле) являются электромагнитными. Реле времени служат для создания независимых выдержек времени действия защиты. Указательные или сигнальные реле сигнализируют о срабатывании отдельных элементов защиты. Промежуточные реле предназначены для разгрузки маломощных контактов основных реле от больших токов и для размножения воспринятого импульса по нескольким цепям.

В электроустановках с напряжением до 6—10 кВ для защиты электрооборудования широко применяют максимальную токовую защиту, которая очень просто осуществляется посредством реле прямого действия (РТМ и РТВ).

При перегрузках нет необходимости в немедленном отключении оборудования, но о таких нарушениях нормальной работы должны быть немедленно получены сигналы. Устройства сигнализации в ряде случаев должны также показывать, в каком положении находятся контакты (включенном или выключенном) отдельных аппаратов.

Наиболее распространенными видами сигнализации являются сигнализация положения, аварийная и предупреждающая.

Сигнализация положения контактных систем оперативных аппаратов (выключателей, разъединителей, предохранителей и т. д.) осуществляется лампами, помещенными в специальную арматуру с цветными светофильтрами.

Предупреждающая сигнализация, оповещающая о наступлении и характере ненормального режима работы, устраивается на подстанциях с постоянным дежурством обслуживающего персонала.

Аварийная сигнализация оповещает об аварийных отключениях выключателей или предохранителей, о прекращении подачи электроэнергии от внешней сети и т. д.

Для предупреждения ненормальных действий обслуживающего персонала применяется блокировка (обычно механическая или электромагнитная). Так, например, поскольку разъединители не имеют дугогасительной камеры, то их включение и отключение может производиться только при разомкнутой силовым выключателем цепи. Следовательно, разъединитель может включаться только до того, как будет включен, а выключаться после того, как будет выключен силовым выключателем. Блокировка исключает возможность иного порядка операций по включению и отключению разъединителей.

Релейная защита, сигнализация и блокировка являются вторичными устройствами, получающими питание от источников

оперативного тока, который может быть как постоянным, так и переменным.

В электроустановках небольшой мощности обычно используют переменный оперативный ток, источником которого служат измерительные трансформаторы тока и напряжения.

Контрольные вопросы

1. Какие типы электростанций существуют в СССР?
2. Что называется энергосистемой?
3. Каково назначение трансформаторных подстанций различного типа?
4. Какое оборудование включает в себя трансформаторная подстанция?
5. Каково назначение релейной защиты?

ГЛАВА XIII ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ ПРИБОРЫ

В связи с автоматизацией производственных процессов всех отраслей промышленности большое значение приобрела промышленная электроника — наука о техническом использовании электронных, ионных и полупроводниковых приборов.

Главная особенность *электронных приборов* (электронных ламп) состоит в том, что прохождение электрического тока в них связано с перемещением электронов в вакууме, а управление перемещающимися электронами осуществляется электрическим полем.

Ионными приборами называются устройства, в которых электрический ток представляет собой поток электронов и заряженных частиц — ионов в сильно разреженной газовой среде под действием сил электрического поля.

Полупроводниковыми приборами являются такие приборы, в которых электрический ток создается перемещающимися под действием электрического поля электронами и дырками* в полупроводниковой среде.

§ 130. ЭЛЕКТРОННАЯ ЭМИССИЯ

Работа электронных и ионных приборов основана на использовании электронной эмиссии. Последняя заключается в выходе в вакуум или разреженный газ электронов с поверхности металлов. Движение этих электрически заряженных частиц создает ток в электронных и ионных приборах. Основные виды электронной эмиссии, используемые в электронике: термоэлектронная, вторичная электронная и фотоэлектронная.

Термоэлектронная эмиссия. В металлах вокруг каждого атома имеются электроны, слабо связанные с ним. Часть этих электронов, оторвавшись от своих ядер, находится в беспорядочном движении. Скорость хаотического движения этих свободных электронов зависит от температуры металла: чем выше температура, тем быстрее перемещаются электроны.

* Процессы, связанные с дырочной проводимостью, изложены в § 150 гл. XIV.

При некоторых значениях температуры (900—1000°С и выше) скорость движения части электронов становится настолько значительной, что, преодолевая силы притяжения ядер атомов, они вырываются из металла и вылетают за его пределы. Это явление носит название *термоэлектронной эмиссии*.

У различных металлов количество испускаемых при одинаковой температуре электронов различно. Наибольшей термоэлектронной эмиссией обладают натрий, калий, цезий, барий и некоторые другие металлы.

При очень высоких температурах нагретый металл начинает испаряться и это ограничивает возможность увеличения термоэлектронной эмиссии путем повышения температуры.

Вторичная электронная эмиссия. Если в вакууме на некотором расстоянии от электрода, из которого вылетают электроны, поместить металлическую пластинку и подать на нее положительный потенциал, то вылетающие с поверхности электрода электроны, несущие отрицательный электрический заряд, будут притягиваться к пластине и с большой скоростью ударять в нее. Под действием ударов быстро летящих электронов с поверхности этой пластины будут выбиваться другие электроны, носящие название *электронов вторичной эмиссии*.

Одной из разновидностей вторичной эмиссии является эмиссия электронов под воздействием бомбардировки материала электрически заряженных частиц — ионов, масса которых значительно больше массы электронов. Вылет электронов с поверхности материалов под действием ионной бомбардировки используется в работе ионных приборов.

Фотоэлектронная эмиссия. Фотоэлектронная эмиссия происходит под воздействием световых, ультрафиолетовых и других лучей, попадающих на поверхность материалов.

Световой поток можно рассматривать как поток мельчайших частиц, носящих название *фотонов*.

Скорость движения фотонов (скорость света) составляет около 300 000 км/сек. Фотоны, ударяясь о поверхность материала, выбивают из него электроны.

Явление, при котором под воздействием световой энергии из материала вырываются электроны, называется *фотоэффектом*. Это явление используется в фотоэлементах.

§ 131. ДВУХЭЛЕКТРОДНАЯ ЛАМПА (ДИОД)

На принципе термоэлектронной эмиссии основана работа электронных ламп. Электронная лампа, имеющая два электрода — катод и анод, называется *двухэлектродной* или *диодом*.

Основными деталями двухэлектродной электронной лампы являются катод и анод, укрепленные в стеклянном или металлическом баллоне, из которого выкачан воздух.

Катод, служащий источником электронов, в простейшем виде представляет собой нить из тугоплавкого металла, обычно вольфрама.

Пропуская по катоду электрический ток, можно накалить его до высокой температуры и тогда из его поверхности в вакуум будут вылетать электроны, образуя вокруг катода электронное облачко (пространственный заряд).

Чтобы катод, изготовленный из вольфрама, испускал нужное для работы электронной лампы количество электронов, он должен быть нагрет до 2000°C . Для поддержания такой высокой температуры по нити накала приходится пропускать ток значительной

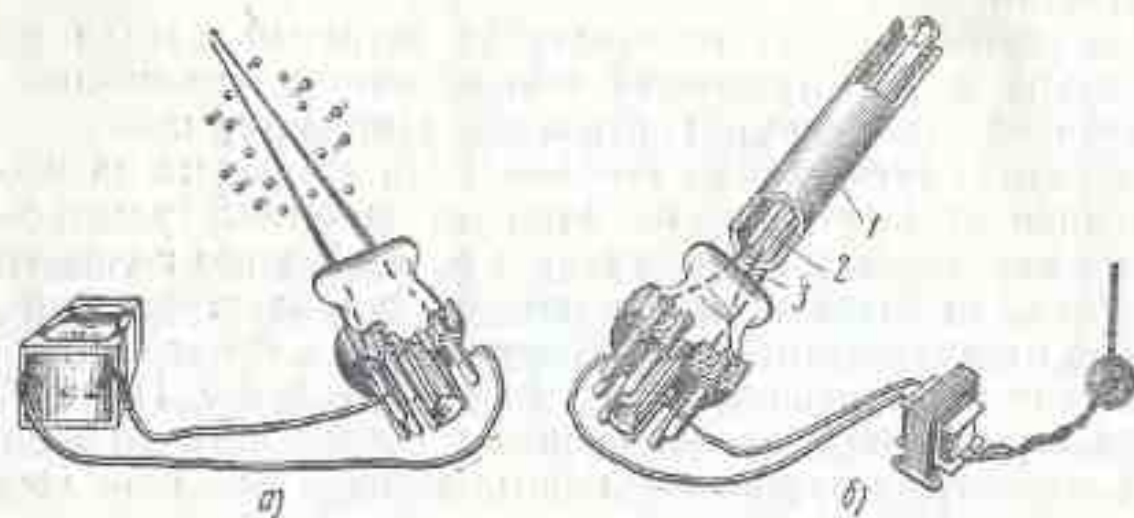


Рис. 174. Катоды электронных ламп:
а — прямого накала, б — косвенного накала; 1 — никелевая трубка, 2 — катод, 3 — нить накала.

силы. Поэтому электронные лампы с вольфрамовым (металлическим) катодом потребляют большую мощность и являются в этом отношении неэкономичными.

Более экономичны активированные металлические катоды. Они представляют собой нить из вольфрама, молибдена или никелевый цилиндр, покрытый тонкой пленкой окиси щелочноземельного металла бария и т. п. Активированные катоды применяют в большинстве электронных ламп; рабочая температура этих катодов $700\text{--}900^{\circ}\text{C}$.

Катоды, у которых поверхность самой нити накала является источником электронов (рис. 174, а), называются *катодами прямого накала*. Недостатком таких катодов является то, что накал нити можно осуществить только от источника постоянного тока и нельзя применять переменный ток. При питании этого катода переменным током из-за малой тепловой инерции катода прямого накала его температура изменяется с удвоенной частотой переменного тока, что приводит к непостоянству потока электронов, в следовательно и тока, протекающего через лампу. По этой причине чаще применяют катоды косвенного накала — подогревные катоды.

Катод косвенного накала (рис. 174, б) представляет собой никелевую трубочку, поверхность которой покрыта тонким слоем оксида, способного испускать электроны при сравнительно низкой температуре. Внутри трубочки находится покрытая изолирующим слоем вольфрамовая нить накала (подогреватель), по которой

пропускают электрический ток. Нагретая током нить накала подогревает активированный оксидный катод и из него вылетают электроны.

По сравнению с катодами прямого накала катоды косвенного накала (подогревные) обладают большой тепловой инерцией. Из-за этого электронная лампа с таким катодом начинает работать не сразу, а через $1\text{--}2$ мик после включения, т. е. после предварительного нагрева. Питание подогревных катодов осуществляется переменным током.

Вокруг катода электронной лампы на некотором расстоянии от него помещается металлический анод, в простейшем виде это цилиндр. Материалами для изготовления анодов являются тугоплавкие металлы — никель, молибден и тантал. Применение таких тугоплавких металлов вызвано тем, что при работе электронных ламп аноды сильно разогреваются.

Анод, как и нить накала, укреплен внутри лампы и соединен с металлическими штырьками цоколя (рис. 175, а), изготовленного из изоляционного материала. Электроды лампы различного типа соединяются со штырьками цоколя определенным образом. Схему соединения электродов лампы со штырьками называют *цоколевкой* (рис. 175, б). Счет штырьков ведется по часовой стрелке от направляющего ключа, если на лампу смотреть со стороны цоколя, повернув его к себе.

Включение электронной лампы в схему осуществляется через ламповую панель, изготовленную из изоляционного материала. При установке штырьков цоколя электронной лампы в отверстия панели электроды лампы через лепестки соединяются с цепью.

Для работы электронной лампы, как уже указывалось, необходимо накаливать ее нить. Для этого в простейшем случае нить соединяют с батареей, которую называют *батареей накала* B_n . Ко второму электроду лампы (аноду) присоединяют другую батарею так, чтобы она своим положительным электродом соединялась с анодом лампы, а отрицательным — с нитью накала (рис. 176, а). Эта батарея называется *анодной батареей* B_a . При таком включении батареи анод заряжен положительно по отношению к катоду и между ними возникает электрическое поле. Когда нить накала нагревается, из катода начнут вылетать электроны, несущие отри-

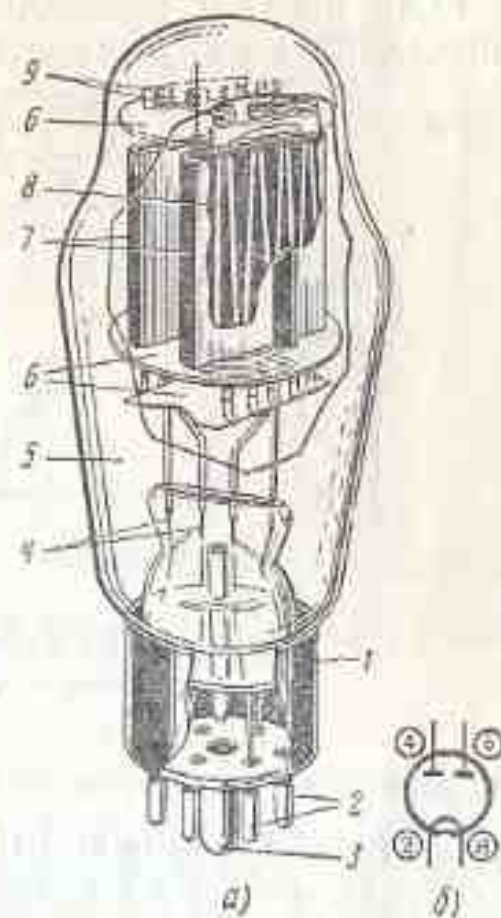


Рис. 175. Электронная лампа:

а — устройство, б — цоколевка анодов; 1 — цоколь, 2 — штырьки, 3 — ключ, 4 — платиновые впадины, 5 — баллон, 6 — слюдяные изоляторы, 7 — аноды, 8 — катод (активированная нить накала), 9 — пружина натяжения нити.

цательный электрический заряд. Эти электроны будут притягиваться положительно заряженным анодом и под действием сил поля пролетать расстояние между катодом и анодом по цепи: катод — анод — сопротивление — миллиамперметр — анодная батарея — катод. Направление тока в цепи, как мы условились считать, будет обратным направлению движения электронов. Эту цепь называют *анодной цепью лампы*.

Если полюсы анодной батареи переключить (к аноду лампы присоединить минус анодной батареи, а к нити накала — плюс), то

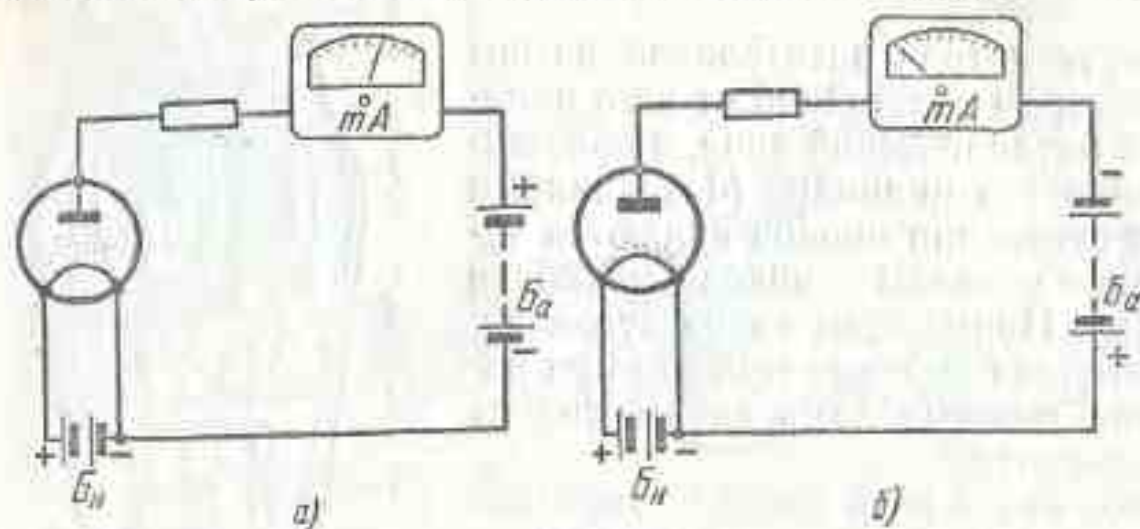


Рис. 176. Схемы, поясняющие работу диода:
а — в цепи лампы проходит ток, б — в цепи лампы тока нет

отрицательно заряженный анод оттолкнет вылетевшие из нити электроны назад на катод и в анодной цепи тока не возникнет (рис. 176, б). Стрелка миллиамперметра останется у нулевого деления.

Таким образом, электронная лампа (диод) проводит ток только в одном направлении — от анода к катоду при наличии положительного заряда на аноде по отношению к катоду.

Свойство двухэлектродной лампы пропускать ток в одном направлении используется для выпрямления переменного тока в постоянный.

§ 132. ХАРАКТЕРИСТИКА И ПАРАМЕТРЫ ДИОДА

Ток в цепи анода лампы зависит от температуры накала нити, т. е. от количества электронов, вылетающих из катода в единицу времени, а также от напряжения на аноде. Если положительное напряжение на аноде мало, то он притягивает небольшое количество электронов и ток в анодной цепи имеет малое значение. С повышением напряжения на аноде ток в цепи увеличивается.

График, показывающий зависимость величины анодного тока от приложенного к аноду напряжения при неизменном токе накала, называется *анодной характеристикой двухэлектродной лампы* (рис. 177).

Кривая (рис. 177) показывает, как изменяется сила анодного тока при изменении величины анодного напряжения и неизменной силе тока накала нити.

Как видно на графике, ток в лампе при увеличении напряжения на аноде возрастает; при некотором положительном напряжении на аноде ток в его цепи достигает наибольшей величины. Дальнейшее повышение напряжения на аноде не вызывает роста тока.

Эта наибольшая величина тока в лампе называется *током насыщения*. Однако у ламп с оксидным катодом явление насыщения мало заметно.

Диоды разных типов отличаются своими параметрами и характеристиками. К основным параметрам диода относятся: напряжение накала U_n , ток накала I_n , ток эмиссии I_a , анодное напряжение U_a . Кроме того, диоды различаются по крутизне их характеристики. Чем быстрее нарастает анодный ток диода при увеличении анодного напряжения, тем больше крутизна характеристики диода. Крутизну обозначают S ; она показывает, на сколько миллиампер увеличивается сила анодного тока диода при повышении анодного напряжения на 1 в:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a}, \quad (155)$$

где ΔI_a — изменение силы анодного тока,
 ΔU_a — изменение анодного напряжения.

Так, если крутизна диода $S = 3 \text{ ма/в}$, то это значит, что при увеличении анодного напряжения на 1 в сила анодного тока возрастет на 3 ма.

К параметрам, которыми характеризуется диод, относится также величина его внутреннего сопротивления переменному току. Внутреннее сопротивление диода не постоянно, а зависит от величины и полярности анодного напряжения, приложенного к диоду. Например, когда к аноду приложено отрицательное напряжение, его внутреннее сопротивление практически бесконечно велико и ток через диод не проходит. Наименьшим внутренним сопротивлением диод обладает в пределах средней прямолинейной части характеристики, где крутизна имеет наибольшее значение. В нижней части характеристики и в верхней части внутреннее сопротивление лампы увеличивается.

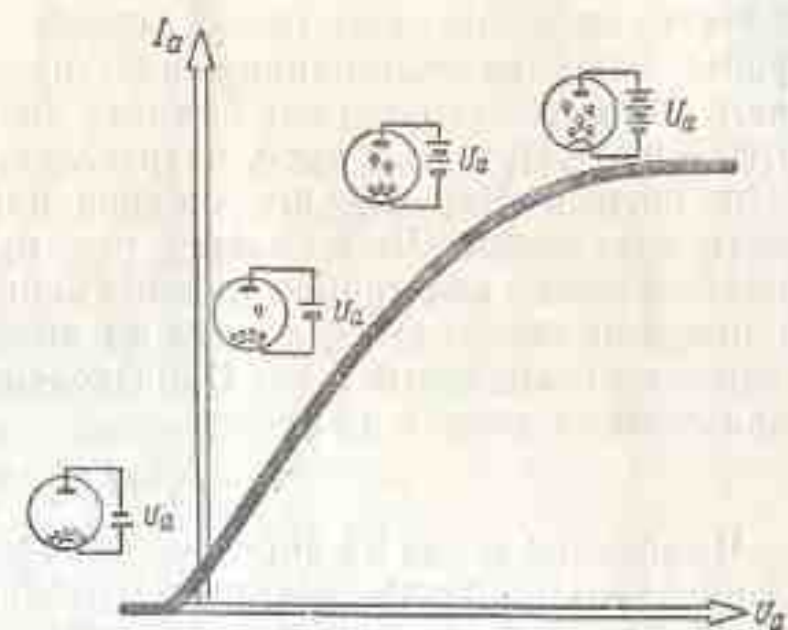


Рис. 177. Характеристика двухэлектродной лампы

Внутреннее сопротивление лампы обозначается R_i . Оно равно отношению изменения анодного напряжения (ΔU_a) к соответствующему изменению анодного тока:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \quad (156)$$

Весьма важным параметром, характеризующим каждую лампу, является величина *допустимой мощности рассеяния* на аноде. Электроны под влиянием напряжения, приложенного к аноду, развивают большую скорость и поэтому со значительной силой ударяются в него. При этом анод, нагреваясь, может раскалиться и даже расплавиться. Чем больше анодное напряжение, тем больше скорость электронов. Чем больше ток, проходящий через диод, тем большее число электронов одновременно ударяет в анод. Поэтому количество тепла, выделяемого на аноде, зависит от анодного напряжения и анодного тока. Произведение этих двух величин равно мощности рассеяния на аноде:

$$P_a = I_a U_a \quad (157)$$

Выделение тепла на аноде — бесполезная, но неизбежная потеря мощности. При очень сильном нагревании анода лампа выходит из строя. Ввиду этого мощность рассеяния не должна превышать некоторую допустимую для данного типа лампы величину.

§ 133. ВЫПРЯМЛЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Переменный ток, как уже известно, удобен для трансформирования и поэтому используется очень широко. Государственные электростанции, снабжающие электроэнергией промышленные предприятия, вырабатывают переменный ток.

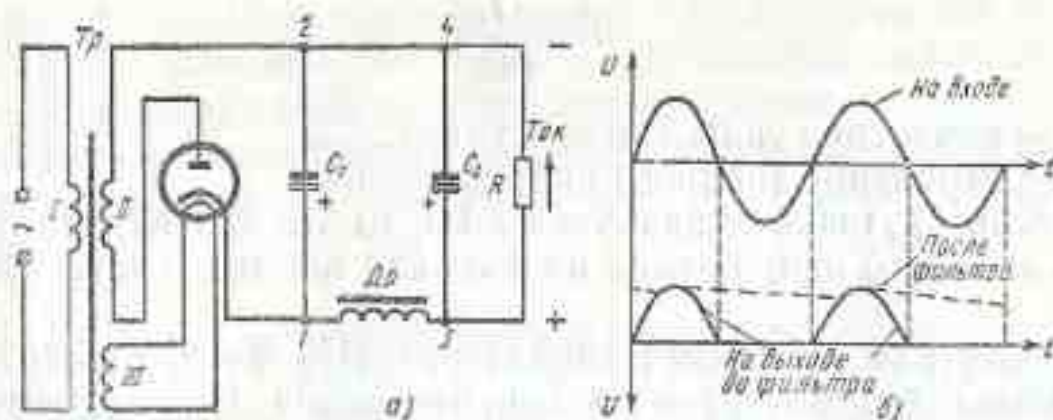


Рис. 178. Однополупериодное выпрямление переменного тока:

а — схема, б — графики напряжения на входе и выходе

Но для многих отраслей промышленности, для электротранспорта, электролизных установок, электронной аппаратуры, для зарядки аккумуляторов требуется электрическая энергия постоянного тока. Это создает необходимость преобразования переменного

тока в постоянный. Процесс преобразования переменного тока в постоянный называется *выпрямлением*.

Прибор, в котором для выпрямления переменного тока применяется электронная лампа (кенотрон), называется *ламповым или кенотронным выпрямителем*.

На рис. 178, а изображена схема однополупериодного кенотронного выпрямителя. Переменный ток проходит через первичную обмотку I трансформатора Tr. Вторичная обмотка II одним концом соединяется с анодом кенотрона, а вторым концом — через нагрузку с катодом. Обмотка III служит для накала нити лампы.

В течение одного полупериода, когда на аноде лампы поддерживается положительное напряжение по отношению к катоду, электроны, вылетающие из нагретого катода под действием электрического поля анода, притягиваются к нему и движутся в направлении: анод лампы — обмотка II трансформатора — нагрузка — дроссель Dr — катод. В другой полупериод, когда на аноде создается отрицательное напряжение по отношению к катоду, электроны, вылетающие из катода, отталкиваются полем анода и в цепи нагрузки ток не течет. В следующие полупериоды процесс повторяется.

Поскольку при этой схеме электрический ток проходит через диод и нагрузку, включенную в его цепь только в течение одного полупериода, такое выпрямление называется *однополупериодным*. График напряжений при однополупериодном выпрямлении приведен на рис. 178, б.

Во время отрицательных полупериодов в цепи нагрузки тока нет, а во время положительных полупериодов нагрузка получает ток одного направления, который все же изменяется по величине так, как изменяется переменный ток в течение положительного полупериода. Такой изменяющийся по величине, но постоянный по направлению ток называется *пульсирующим*.

Чтобы уменьшить пульсацию тока и превратить его в постоянный ток, не изменяющийся по величине, применяют сглаживающие фильтры.

Пульсирующий электрический ток можно себе представить как сумму постоянных и переменных токов, или, иначе говоря, как сумму постоянной и переменной составляющих. Роль фильтра заключается в том, чтобы не пропускать через нагрузку переменные составляющие и пропускать постоянную составляющую, т. е. постоянный ток.

Сглаживающий фильтр обычно состоит из катушки индуктивности (дросселя) и конденсаторов. Известно, что катушка индуктивности обладает индуктивным сопротивлением

$$X_L = 2\pi fL.$$

Оно становится тем больше, чем выше частота f переменного тока, протекающего по катушке, и больше ее индуктивность L . Из этого следует, что переменному току дроссель оказывает большое сопротивление и сильно его уменьшает. Для постоянного же тока дроссель не представляет собой большого сопротивления,

и ток легко проходит по обмотке дросселя. Конденсатор, наоборот, не пропускает постоянного тока и свободно пропускает переменный. Как известно, сопротивление конденсатора

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC},$$

поэтому чем выше частота f тока в цепи, в которую включен конденсатор, и чем больше емкость C конденсатора, тем меньше сопротивление он оказывает переменному току.

Эти свойства дросселя и конденсатора используются для сглаживания пульсирующего электрического тока.

Сглаживающий фильтр включается в схему выпрямителя (рис. 178, а). Действие сглаживающего фильтра заключается в следующем. В течение положительного полупериода, когда через лампу

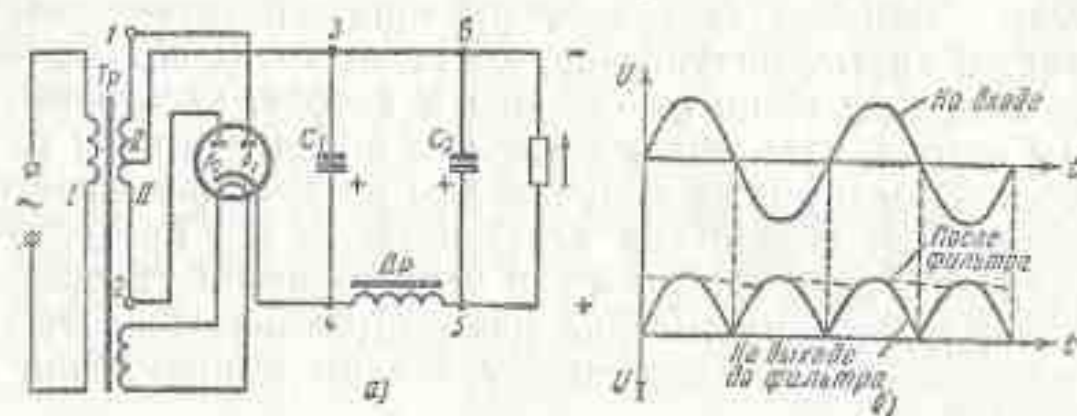


Рис. 179. Двухполупериодное выпрямление переменного тока.

а — схема, б — графики напряжения на входе и выходе

проходит ток, конденсатор C_1 , подключенный к точкам 1 и 2, заряжается до наибольшего значения переменного напряжения на зажимах вторичной обмотки II трансформатора Tp . В течение отрицательного полупериода, когда ток в лампе прекращается, этот конденсатор разряжается и поддерживает напряжение на нагрузочном сопротивлении. По мере разряда конденсатора сила тока, конечно, уменьшается и поэтому ток в цепи все же пульсирует. Для снижения пульсации между точками 1 и 3 включен дроссель Dr , а между точками 3 и 4 — еще конденсатор C_2 . Дроссель оказывает значительное сопротивление переменным составляющим пульсирующего тока и почти не пропускает их. Через конденсатор C_2 проходят те переменные составляющие, которые в незначительном количестве протекают через дроссель. В результате этого на зажимах нагрузки получается относительно постоянное напряжение.

Для получения выпрямленного напряжения со значительно меньшими пульсациями широко применяется схема двухполупериодного выпрямления переменного тока (рис. 179). Для этих целей служат двухполупериодные выпрямители, в которых используют электронные лампы, имеющие два анода, — двуханодные кенотроны.

Выпрямитель работает так. Допустим, что в течение одного

полупериода напряжение, подаваемое со вторичной обмотки трансформатора к анодам кенотрона, имеет положительное значение (плюс) на аноде A_1 и отрицательное (минус) на аноде A_2 по отношению катоду. Тогда ток пройдет от точки 1 вторичной обмотки трансформатора к аноду A_1 , а затем через катод, дроссель, нагрузку — к средней точке вторичной обмотки трансформатора.

Через анод A_2 , имеющий отрицательный потенциал, ток не потечет.

В течение второго полупериода полярность напряжения на анодах изменится. Ток пройдет от точки 2 вторичной обмотки трансформатора к аноду A_2 , катоду, дросселю, нагрузке и к средней точке вторичной обмотки трансформатора.

В следующие полупериоды процесс повторится. Через нагрузку ток протекает всегда в одном и том же направлении. Поскольку ток проходит через нагрузку в одном и том же направлении в течение каждого из двух полупериодов, такое выпрямление называется *двухполупериодным*.

График напряжений при двухполупериодном выпрямлении приведен на рис. 179, б. Качество сглаживания получается лучше, чем при однополупериодном выпрямлении, так как частота переменных составляющих увеличивается в два раза, и следовательно, возрастает для них индуктивное сопротивление дросселей при двойном уменьшении емкостного сопротивления конденсаторов.

§ 134. ТРЕХЭЛЕКТРОДНАЯ ЛАМПА (ТРИОД)

Электронная лампа, имеющая три электрода, называется *триодом*. Устройство одного из типов триода показано на рис. 180.

Триод отличается от диода тем, что между его катодом и анодом находится третий электрод, выполненный в виде проволочной спирали, который называется *сеткой*. Анод, сетка и катод присоединяются, как и у диода, к штырькам цоколя лампы.

По своему расположению сетка мешает или помогает электронам, вылетевшим с катода, достигнуть анода. Между сеткой и катодом включается напряжение, которое называется *сеточным напряжением* U_c .

Когда напряжение на сетке триода равно нулю (рис. 181, а), лампа работает как диод. Приложенное между сеткой и катодом напряжение U_c создает дополнительное электрическое поле, воздействующее на летящие от катода к аноду электроны. Если это напряжение отрицательно, то вылетающие из катода электроны оказываются под действием притягивающей силы положительно заряженного анода и отталкивающей силы отрицательно заряженной сетки. Если отрицательное напряжение на сетке мало, то ее отталкивающая сила, действующая на электроны, невелика, поэтому сравнительно большая часть электронов пролетает через сетку к аноду.

Однако с увеличением отрицательного напряжения на сетке отталкивающая сила электрического поля, действующая на электро-

ны, возрастает. Вследствие этого сквозь сетку к аноду пролетает меньшее число электронов и анодный ток уменьшается. Роль отрицательно заряженной сетки подобна роли регулируемого сопротивления в электрической цепи.

При некотором значении отрицательного напряжения на сетке величина ее отталкивающей силы становится настолько большой,

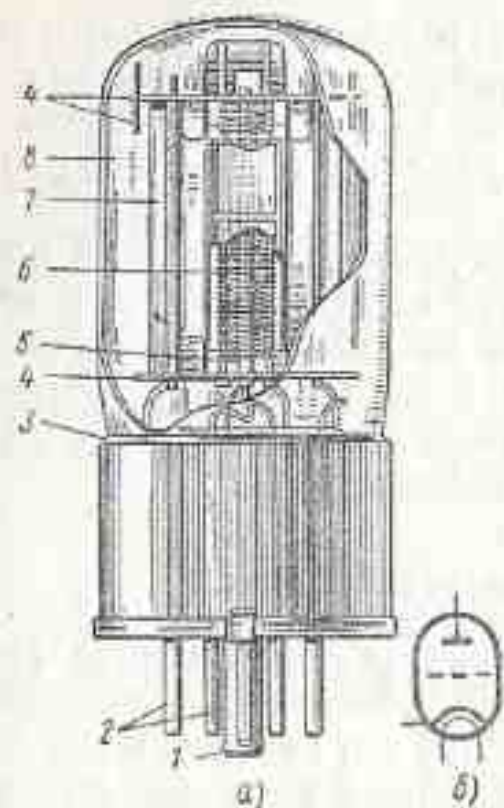


Рис. 180. Триод:

а — устройство, б — условное обозначение; 1 — ключ, 2 — щиты, 3 — доколь, 4 — sleeve-инсулятор, 5 — катод, 6 — сетка, 7 — анод, 8 — баллон

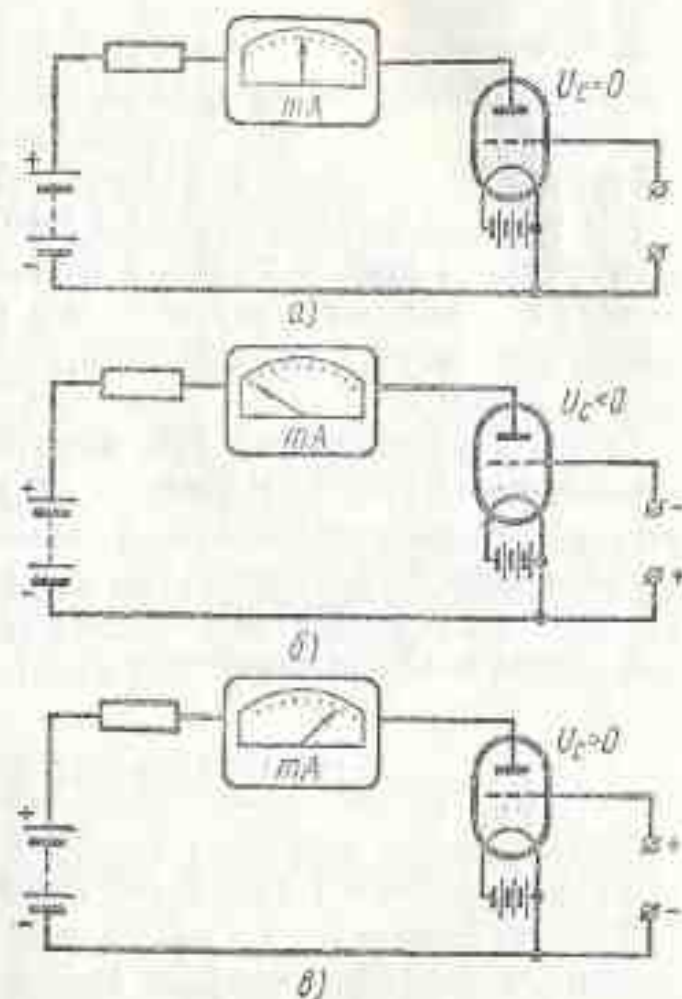


Рис. 181. Схема, поясняющая работу триода:

а — напряжение на сетке равно нулю, б — напряжение на сетке отрицательное, в — напряжение на сетке положительное

что ни один электрон не в состоянии пролететь сквозь сетку к аноду; анодный ток становится равным нулю. В этих условиях лампа «заперта» (рис. 181, б).

Если к сетке приложить не отрицательное, а положительное напряжение (рис. 181, в), то на электроны будут действовать две одинаково направленные силы: электрического поля анода и положительного заряда сетки. Большая часть электронов, пролетевших сквозь сетку, достигнет анода, но значительная часть их притянется на сетку и образует сеточный ток. Этот ток весьма нежелателен, так как он вызывает вредный нагрев сетки и уменьшает силу анодного тока. По этим причинам в большинстве электронных устройств во время работы триода потенциал сетки должен оставаться отрицательным.

Сетка находится ближе к катоду, чем анод; поэтому изменение напряжения на ней значительно сильнее влияет на величину анодного тока, чем такое же изменение напряжения на аноде. Это позволяет путем небольшого изменения сеточного напряжения U_c значительно изменять силу анодного тока.

Таким образом, посредством изменения напряжения, подаваемого на сетку, можно управлять силой тока в анодной цепи лампы. Поэтому сетку называют *управляющей*.

Из сказанного следует, что триод изменяет свое сопротивление в зависимости от величины (и знака) напряжения, подаваемого на сетку. Это значит, что трехэлектродная лампа может служить безынерционным регулируемым сопротивлением.

§ 135. ХАРАКТЕРИСТИКА И ПАРАМЕТРЫ ТРИОДА

Важнейшей характеристикой триода является анодно-сеточная (рис. 182, а). Она представляет собой график зависимости анодного тока от напряжения на сетке при неизменном напряжении на аноде лампы.

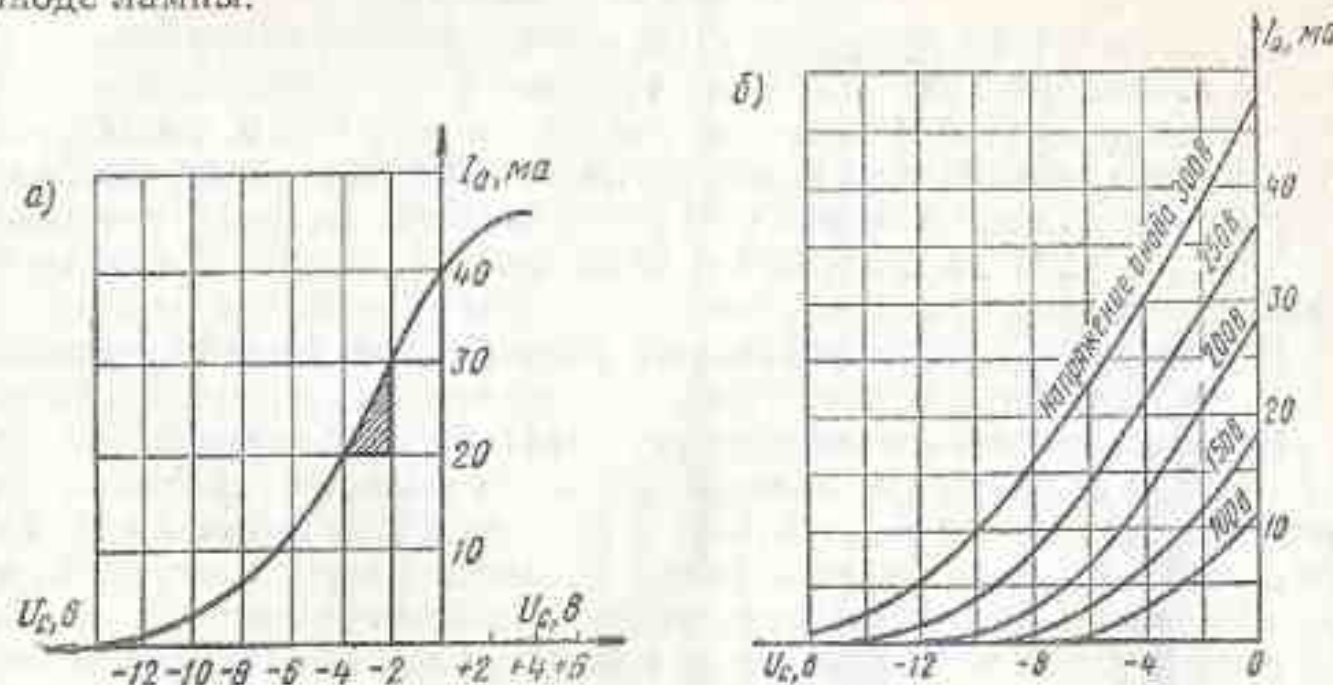


Рис. 182. Характеристика триода:

а — анодно-сеточная, б — семейство анодно-сеточных характеристик

По вертикали отложена сила анодного тока при различных напряжениях на сетке, причем анодное напряжение поддерживается постоянным. С изменением сеточного напряжения от отрицательного значения до нуля сила анодного тока возрастает от нуля до определенной величины. Вместе с тем, чем выше напряжение на аноде, тем больше сила анодного тока при данном напряжении на сетке.

К основным параметрам триода относятся крутизна характеристики, внутреннее сопротивление и коэффициент усиления.

Крутизна, т. е. угол наклона характеристики триода, показывает, на сколько миллиампер изменяется сила анодного тока при изменении напряжения на сетке на 1 в и постоянном анодном напряжении:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \quad (158)$$

где ΔI_a — изменение силы анодного тока, *ма*,
 ΔU_c — изменение напряжения на сетке, *в*,
 S — крутизна характеристики триода, *ма/в*.

Для определения крутизны характеристики графическим способом надо построить на ней прямоугольный треугольник, гипотенузой которого является интересующий вас участок характеристики. Катетами этого треугольника являются линии, параллельные осям графика. Горизонтальный катет показывает величину изменения напряжения на сетке ΔU_c , а вертикальный — изменение анодного тока ΔI_a . Разделив числа, соответствующие этим отрезкам ΔU_c и ΔI_a , найдем крутизну характеристики на заданном участке.

Пример. Изменение напряжения на сетке триода на 2 в приводит к изменению анодного тока на 10 ма. Определить крутизну характеристики.
Решение.

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} = \frac{10}{2} = 5 \text{ ма/в.}$$

Характеристики триода, снятые при различных напряжениях на аноде лампы, располагаются на графике почти параллельно одна относительно другой. Однако, как видно из рис. 182, б, характеристика триода, снятая при большем напряжении на аноде, располагается выше и левее, а снятые при более низком напряжении — ниже.

Такая группа характеристик называется *семейством анодно-сеточных характеристик*.

Параметром, характеризующим усилительные свойства триода, является *коэффициент усиления*.

Близко расположенная к катоду сетка воздействует на электроны гораздо сильнее, чем далеко расположенный анод. Поэтому изменить анодный ток на некоторую определенную величину можно либо соответствующим изменением анодного напряжения, либо во много раз меньшим изменением напряжения на сетке.

Коэффициент усиления лампы μ определяется отношением изменения анодного напряжения к изменению напряжения на сетке при постоянном анодном токе:

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c} \quad (159)$$

Пример. В лампе, в которой для изменения анодного тока на 2 ма необходимо либо изменить анодное напряжение на 18 в, либо сеточное напряжение на 0,3 в. Определить коэффициент усиления.
Решение.

$$\mu = \frac{18}{0,3} = 60.$$

В данном случае можно сказать, что напряжение на сетке воздействует на вылетающие из катода электроны в 60 раз сильнее анодного напряжения.

Коэффициент усиления триодов лежит в пределах 4—100.

Внутреннее сопротивление триодов имеет различную величину и измеряется в зависимости от рабочего режима триода. Современные триоды обладают внутренним сопротивлением 1000—100 000 ом. Так, если в лампе при изменении анодного напряжения на 10 в анодный ток изменяется на 2 ма (0,002 а), то внутреннее сопротивление такой лампы, определяемое путем деления изменения напряжения на изменение силы тока, равно:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{10}{0,002} = 5000 \text{ ом.} \quad (160)$$

Величину внутреннего сопротивления лампы можно определить по семейству характеристик.

На рис. 182, б видно, что при напряжении на сетке $U_c = 0$ и анодном напряжении 100 в анодный ток равен 10 ма (нижняя характеристика). При анодном напряжении $U_a = 150$ в анодный ток равен 18 ма, следовательно, при изменении анодного напряжения $\Delta U_a = 150 - 100 = 50$ в анодный ток изменился $\Delta I_a = 18 - 10 = 8$ ма (0,008 а).

Внутреннее сопротивление лампы

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{50}{0,008} = 6250 \text{ ом.}$$

Для триодов разных типов требуется различное напряжение накала U_n и анодное напряжение U_a . Триоды также отличаются по величине мощности рассеяния на аноде P_a .

Межэлектродной емкостью называется емкость, образованная близко расположенными друг к другу электродами триода, которые разделены диэлектриком — вакуумом.

В триоде образуется межэлектродная емкость между анодом и сеткой (C_{a-c}) между катодом и сеткой и между анодом и катодом. Величина этих емкостей составляет 2—10 пф. Эти емкости являются нежелательными и их называют паразитными. Особенно вредной является межэлектродная емкость между анодом и сеткой C_{a-c} (рис. 183), так как через эту емкость осуществляется паразитная связь между анодом и цепью сетки.

Когда на управляющую сетку триода не подаются сигналы, подлежащие усилению, емкость C_{a-c} заряжается до уровня напряжения, действующего между анодом и сеткой лампы.

При подаче усиливаемого сигнала на сетку триода изменяется напряжение на аноде и при этом емкость C_{a-c} будет заряжаться или разряжаться. Цепь заряда этой емкости такая: $+E_n, R_a, C_{a-c}, R_c, \text{земля}$. Цепь разряда этой емкости будет: $+C_{a-c}, \text{анод, катод, } R_c, -C_{a-c}$.

Как видно из схемы, заряд и разряд емкости протекает через

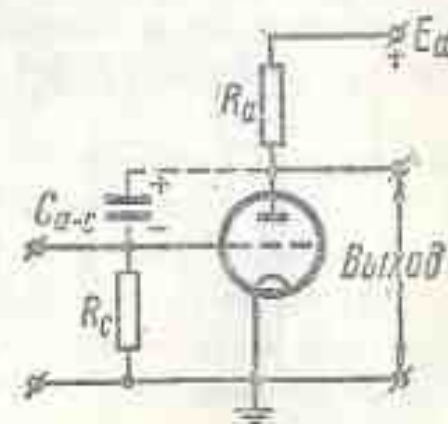


Рис. 183. Схема межэлектродных емкостей триода

сопротивление R_0 и на нем создается напряжение, которое приложено к управляющей сетке наряду с напряжением усиливаемого сигнала. Таким образом, любое изменение анодного напряжения будет оказывать влияние через межэлектродную емкость C_{a-c} на цепь сетки, что может привести к самовозбуждению усилителя и к искажению усиливаемых сигналов.

Паразитная связь анод—сетка особенно сильно проявляется при подведении к сетке триода сигналов высокой частоты, так как емкостное сопротивление C_{a-c} с повышением частоты уменьшается

$$X_c = \frac{1}{\omega C}.$$

§ 136. ПРИНЦИП УСИЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

При помощи триода может быть осуществлено усиление переменных напряжений различных частот.

Схема простейшего усилителя (рис. 184, а) содержит триод, анодную батарею B_a , батарею накала B_n , сопротивление R_c , выход-

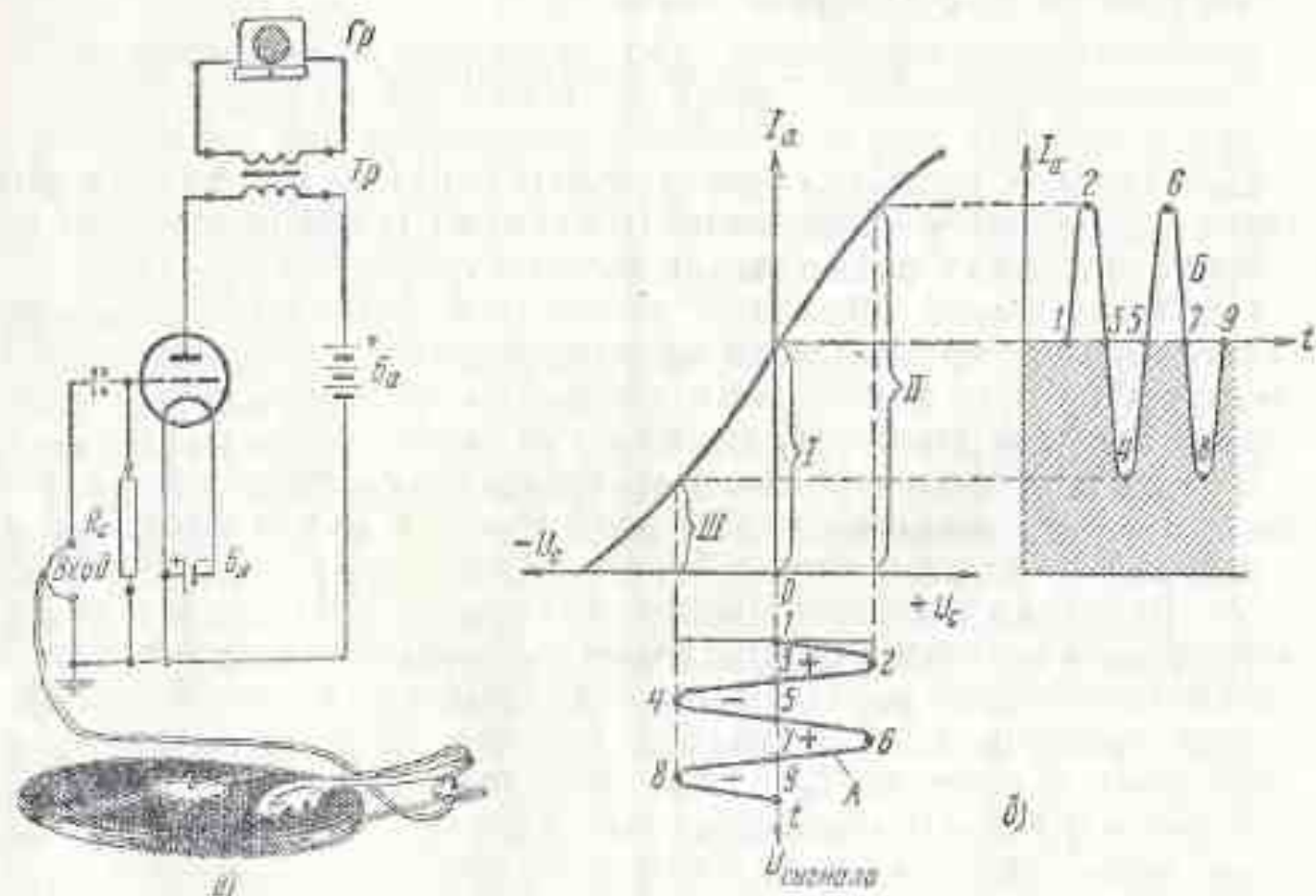


Рис. 184. Усилитель низкой частоты:
а — схема, б — графическое изображение усижительного процесса

ной трансформатор Tr . К зажимам входа усилителя подключен электромагнитный звукосниматель (адаптер), а на выходе — громкоговоритель Gr (репродуктор).

Работа усилителя, собранного по этой схеме, происходит следующим образом. Переменное напряжение от звукоснимателя или микрофона включается между сеткой и катодом триода. Напряжение под действием сетки изменяет силу анодного тока триода. Вслед-

ствие этого протекающий через обмотку громкоговорителя усиленный лампой ток изменяется со звуковой частотой и заставляет с этой же частотой колебаться его диффузор. Таким образом, под влиянием усилительных свойств триода, при помощи очень незначительного переменного напряжения на сетке, возникающего в результате слабых колебаний иглы звукоснимателя, получают значительные изменения анодной силы тока, создающие звук в громкоговорителе.

Чтобы лучше представить себе, как происходит усилительный процесс, рассмотрим график (рис. 184, б). Будем считать, что при воспроизведении звукозаписи звукосниматель создает переменное напряжение на сетке лампы, которое изменяется так, как показано на кривой A , изображенной внизу на графике. В первый момент времени 1 напряжение на сетке равно нулю. Поэтому сила анодного тока в этот момент равна величине, отмеченной скобкой I . В момент 2 напряжение сигнала на сетке стало положительным и анодный ток увеличивается (отмечено скобкой II). В момент 3 напряжение сигнала уменьшилось и стало равным нулю и, следовательно, уменьшилась сила тока до значения, отмеченного скобкой I . В момент 4 напряжение на сетке стало отрицательным, поэтому соответственно уменьшилась сила тока до значения, отмеченного скобкой III .

Продолжая эти рассуждения, убедимся, что в цепи анода сила тока I_a , как показано на кривой B , изменяется с частотой изменения напряжения на сетке. Амплитуда колебаний анодной силы тока зависит от крутизны характеристики триода и амплитуды напряжения, подаваемого на сетку. Чем больше крутизна характеристики лампы, тем сильнее изменения анодной силы тока при одной и той же амплитуде колебаний на сетке.

В условиях, соответствующих схеме рис. 184, при отсутствии сигнала потенциал сетки по отношению к катоду равен нулю, так как сетка через сопротивление R_c (порядка 0,5—1 мом) электрически соединена с катодом. При изменении напряжения сигнала потенциал сетки в один полупериод будет положительным; в это время будет возникать сеточный ток, вследствие чего усиливаемый положительный полупериод сигнала будет искажаться.

Чтобы предупредить возникновение сеточного тока, на сетку подается небольшое постоянное напряжение $U_{см}$, создающее постоянное отрицательное сеточное смещение. Это напряжение выбирают такой величины чтобы потенциал сетки оставался отрицательным в течение всего периода сигнала (рис. 185, а).

В большинстве случаев для получения отрицательного смещения используется падение напряжения от постоянной составляющей анодного тока на сопротивлении $R_{см}$ (рис. 185, б). Это сопротивление шунтируется конденсатором $C_{тп}$ значительной емкости (порядка нескольких микрофард), который предназначен для пропускания переменной составляющей анодного тока, помимо сопротивления $R_{см}$. Это необходимо, чтобы устранить нежелательную переменную составляющую в напряжении сеточного смещения. Сопротивление R_0 используется для того, чтобы передать отрицательное

смещение на сетку. Усиления, даваемого одним триодом, в большинстве случаев недостаточно. Чтобы его увеличить, приходится применять многокаскадные усилители, в которых сигнал, усиленный одним триодом, подается для дальнейшего усиления на вход (сетку) второго триода (во второй каскад) и т. д.

Для питания всех ламп многокаскадного усилителя от одного источника анодного напряжения каскады электрически разделяются между собой емкостями или трансформаторами.

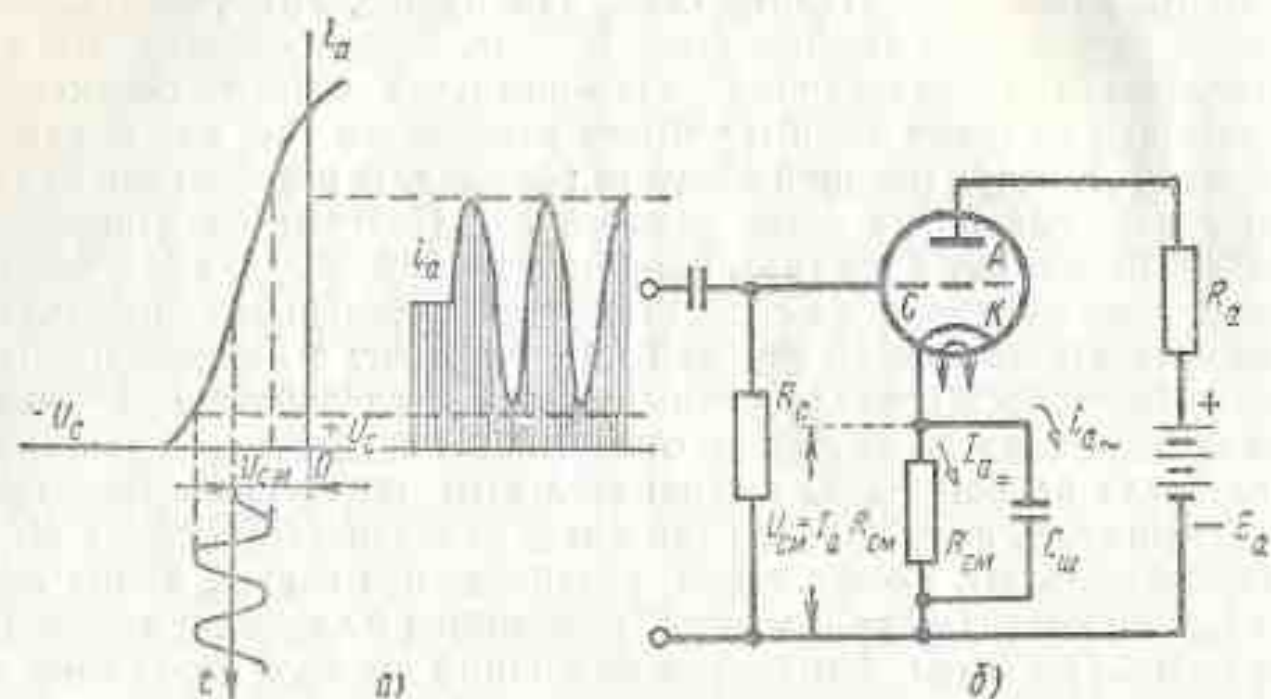


Рис. 185. График усиления при наличии отрицательного смещения на сетке (а) и схема автоматического сеточного смещения (б)

Коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления его каскадов. Но коэффициент усиления каждого из каскадов меньше коэффициента усиления лампы из-за внутренних потерь напряжения в каскаде.

Если у трехкаскадного усилителя коэффициент усиления каждого каскада 25, то общий коэффициент этого усилителя составит: $25 \times 25 \times 25 = 15\,625$. Таким образом, при помощи электронных ламп можно усиливать слабые электрические колебания в десятки, сотни, тысячи и миллион раз.

§ 137. ЛАМПОВЫЙ ГЕНЕРАТОР

Выше было рассмотрено применение трехэлектродной лампы в электронном усилителе. Однако триоды широко применяют и в ламповых генераторах, которые служат для создания переменных токов различной частоты.

Простейшая схема лампового генератора приведена на рис. 186. Основными его элементами являются триод и колебательный контур. Для питания нити накала лампы используется батарея накала B_n . В цепь анода включена анодная батарея B_a и колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности L_k и конденсатора C_k . Катушка L_c включена в цепь сетки и связана индуктивно с катуш-

кой L_k колебательного контура. Если зарядить конденсатор, а затем замкнуть его на катушку индуктивности, то конденсатор будет периодически разряжаться и заряжаться, а в цепи колебательного контура возникнут затухающие электрические колебания тока и напряжения. Затухание колебаний вызвано потерями энергии в контуре. Для получения незатухающих колебаний переменного тока необходимо периодически с определенной частотой добавлять энергию в колебательный контур с помощью быстродействующего устройства. Таким устройством является триод.

Если накалить катод лампы и замкнуть анодную цепь, то в цепи анода появится электрический ток, который зарядит конденсатор C_k колебательного контура. Конденсатор, разряжаясь на катушку индуктивности L_k , вызовет в контуре затухающие колебания. Переменный ток, проходящий при этом через катушку L_k , индуцирует в катушке L_c переменное напряжение, воздействующее на сетку лампы и управляющее силой тока в цепи анода.

Когда на сетку лампы подается отрицательное напряжение, анодный ток в ней уменьшается. При положительном напряжении на сетке лампы в анодной цепи увеличивается ток. Если в этот момент на верхней пластине конденсатора C_k колебательного контура будет отрицательный заряд, то анодный ток (поток электронов) зарядит конденсатор и тем самым скомпенсирует потери энергии в контуре.

Процесс уменьшения и увеличения тока в анодной цепи лампы повторится во время каждого периода электрических колебаний в контуре.

Если при положительном напряжении на сетке лампы верхняя пластина конденсатора C_k заряжена положительным зарядом, то анодный ток (поток электронов) не увеличивает заряда конденсатора, а, наоборот, уменьшает его. При таком положении колебания в контуре не будут поддерживаться, а будут затухать. Чтобы этого не случилось, необходимо правильно включать концы катушек L_k и L_c и обеспечить этим своевременный заряд конденсатора. Если колебания в генераторе не возникают, то необходимо поменять местами концы одной из катушек.

Ламповый генератор является преобразователем энергии постоянного тока анодной батареи в энергию переменного тока, частота которого зависит от индуктивности катушки и емкости конденсатора, образующих колебательный контур. Нетрудно понять, что это преобразование в схеме генератора выполняет триод. Э. д. с., индуцируемая в катушке L_c током колебательного контура, периодически воздействует на сетку лампы и управляет анодным током,

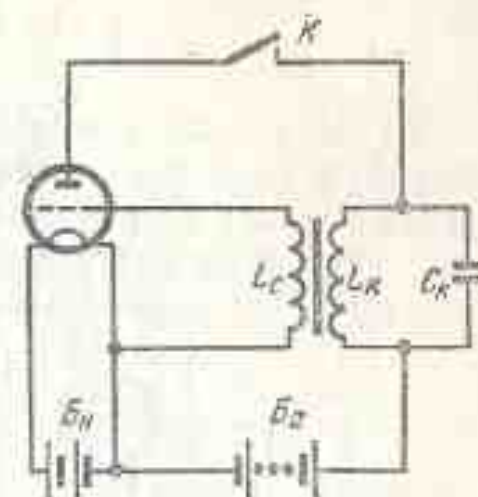


Рис. 186. Схема простейшего лампового генератора

который, в свою очередь, с определенной частотой подзаряжает конденсатор, возмещая таким образом потери энергии в контуре. Такой процесс повторяется многократно в течение всего времени работы генератора.

Рассмотренный процесс возбуждения незатухающих колебаний в контуре называют *самовозбуждением* генератора, так как колебания в генераторе сами себя поддерживают.

§ 138. ТРИОД В ЭЛЕКТРОННОМ РЕЛЕ

Триоды также применяют в электронных реле, которые под воздействием электрического сигнала осуществляют включение, выключение или переключение электрических цепей. Электронные реле являются наиболее чувствительными и быстродействующими,

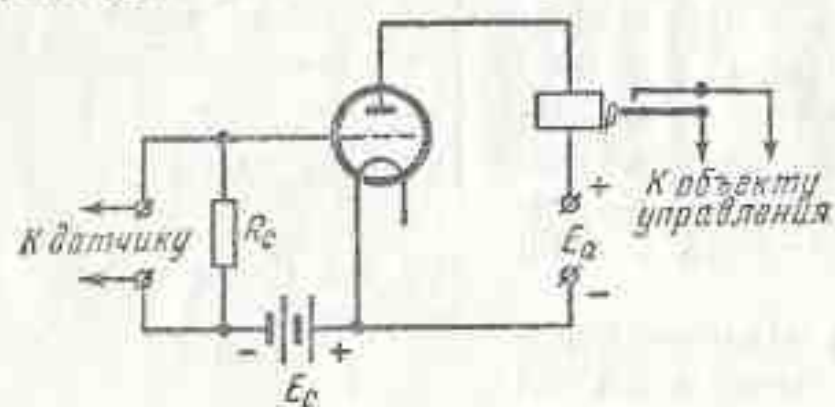


Рис. 187. Схема электронного реле

а потому они получили широкое распространение. Электронное реле (рис. 187) представляет собой усилитель на триоде, в анодную цепь которого включено электромагнитное реле. При подаче на сетку лампы небольшого положительного напряжения от датчика, подключенного к ней, анодный ток вследствие усиленных свойств триода значительно увеличивается. Электромагнитное реле срабатывает, переключает свои контактные пружины и осуществляет включение, выключение или переключение тех устройств, которыми оно управляет.

§ 139. ЧЕТЫРЕХЭЛЕКТРОДНАЯ ЛАМПА (ТЕТРОД)

Недостатком триода является наличие значительной межэлектродной емкости в системе анод — сетка. От этого недостатка свободен тетрод, в котором между управляющей сеткой и анодом помещена дополнительная *экранирующая* сетка.

Анод, катод и управляющая сетка тетрода включаются так же, как и в триоде. К экранирующей сетке подводят положительное напряжение по отношению к катоду, несколько меньшее, чем анодное напряжение. Наличие положительного заряда дополнительной сетки ослабляет действие поля анода на электроны, движущиеся между катодом и управляющей сеткой, а действие поля управляющей сетки остается таким же, как в триоде. Вследствие этого в выражении коэффициента усиления $\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}$ увеличивается ΔU_a , а ΔU_c остается без изменения. Таким образом, коэффициент усиле-

ния тетрода в десятки и даже сотни раз больше, чем коэффициент усиления триода, и достигает значений порядка 1000.

Рассмотрим процесс ослабления паразитных связей между цепью анода и цепью управляющей сетки тетрода.

В тетроде вместо межэлектродной емкости C_{a-c} имеются межэлектродные емкости между анодом и экранирующей сеткой $C_{a-э}$ и между экранирующей сеткой и управляющей сеткой $C_{э-c}$ (рис. 188). При изменении анодного напряжения емкость $C_{a-э}$ заряжается и разряжается не через сопротивление R_c цепи управляющей сетки, как в триоде, а через конденсатор $C_б$, включенный в цепь экранирующей сетки.

Это связано с тем, что емкостное сопротивление конденсатора $C_б$ меньше сопротивления резистора R_c , соединенного последовательно с межэлектродной емкостью $C_{э-c}$. В результате изменение напряжения в анодной цепи не передается в цепь управляющей сетки тетрода и искажение усиливаемых сигналов не происходит. Поэтому тетрод можно успешно применить для усиления колебаний не только низкой, но и высокой частоты. Тетрод имеет и существенный недостаток, заключающийся в том, что в нем возникает поток электронов вторичной эмиссии от анода к экранирующей сетке. Это явление вызвано тем, что электроны, летящие с большой скоростью на анод, ударяют в него и выбивают из его поверхности вторичные электроны.

Когда во время работы лампы напряжение на экранирующей сетке может оказаться больше, чем напряжение на аноде, вторичные электроны притягиваются полем этой экранирующей сетки, и в ее цепи появляется ток вторичных электронов, что приводит к уменьшению анодного тока и нарушению нормальной работы тетрода. Характеристика тетрода становится нелинейной (при увеличении анодного напряжения сила тока в цепи анода убывает). Это явление называется *динаatronным эффектом*.

Промышленность выпускает усовершенствованные тетроды, в которых исключена возможность возникновения динаatronного эффекта. Такие тетроды носят название *лучевых тетродов*.

Лучевой тетрод (рис. 189, а) представляет собой стеклянный баллон 1, в котором помещается катод 6 и анод 2. Между этими электродами размещены две сетки. Сетка малого диаметра 5 является управляющей, а сетка большого диаметра 6 — экранирующей. Она расположена в лампе так, что ее витки размещены против витков управляющей сетки. В баллон также вмонтированы специальные лучеобразующие электроды 3, которые соединены с катодом и всегда имеют отрицательный заряд по отношению к аноду. Все электроды лампы припаиваются к штырькам цоколя.

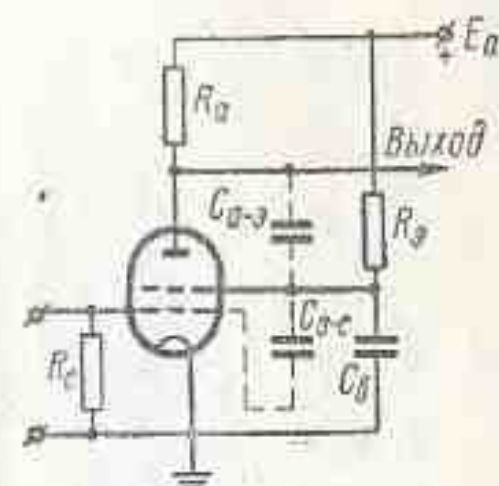
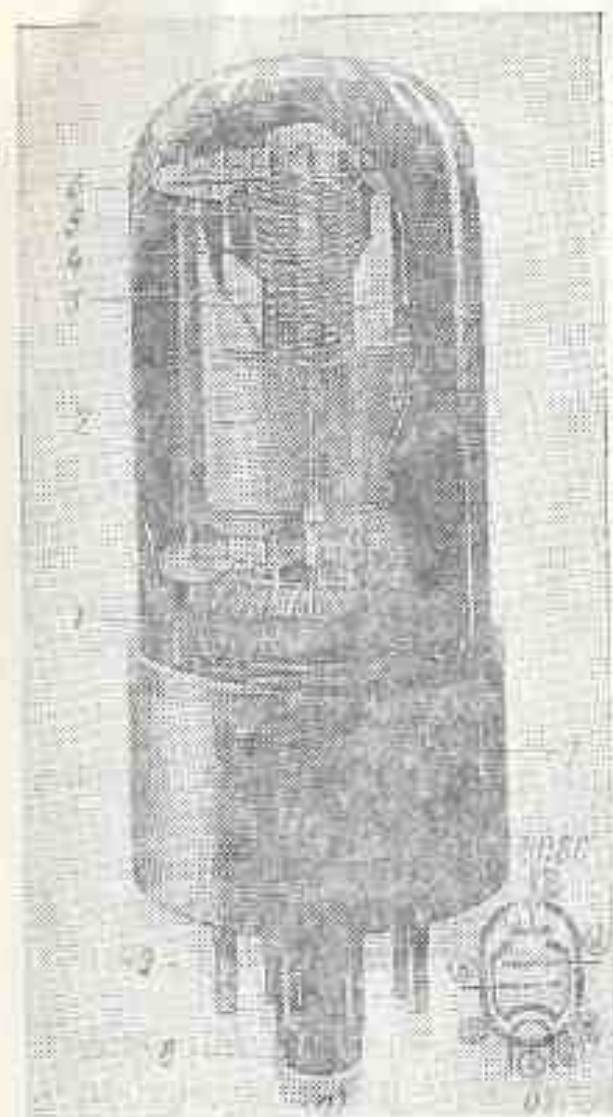


Рис. 188. Схема межэлектродных емкостей тетрода

Лучеобразующие электроды и особое расположение сеток в тетроде способствуют тому, что электроны в нем летят к аноду не сплошным потоком, как в диоде и триоде, а отдельными лучами (пучками).



В результате большой плотности движущихся отрицательных зарядов в электронном луче они создают эффект неподвижного в пространстве отрицательного объемного заряда. Такой объемный заряд отталкивает электроны вторичной эмиссии назад на анод, препятствуя возникновению нежелательного для работы лампы динаotronного эффекта. Однако при малых токах и в лучевом тетроде появляется динаotronный эффект, поэтому лучевые тетроды применяют лишь в качестве мощных усилительных ламп. Схема включения лучевого тетрода приведена на рис. 189, в.

§ 140. ПЯТИЭЛЕКТРОДНАЯ ЛАМПА (ПЕНТОД)

Для устранения вредного эффекта вторичной эмиссии между экранирующей сеткой лампы и анодом помещают дополнительно еще одну сетку, носящую название *защитной* или *антидинаotronной*.

Такая лампа имеет пять электродов (в том числе три сетки) и поэтому ее называют *пятиэлектродной лампой* или *пентодом* (рис. 190).

Защитную сетку обычно соединяют с катодом и поэтому на ней имеется отрицательный электрический заряд. Этот заряд отталкивает назад вторичные электроны, выбитые из поверхности анода, и они не долетают до экранирующей сетки, как в тетроде. Защитная сетка улучшает характеристики лампы, в частности коэффициент усиления пентодов значительно больше, чем у тетродов, и достигает нескольких тысяч. В связи с этим пентоды исполь-

зуют для усиления напряжения высокой и низкой частоты. Схема включения пентода приведена на рис. 190, в.

В электронной аппаратуре также широко применяют комбинированные и сложные многосеточные лампы. Первые представляют

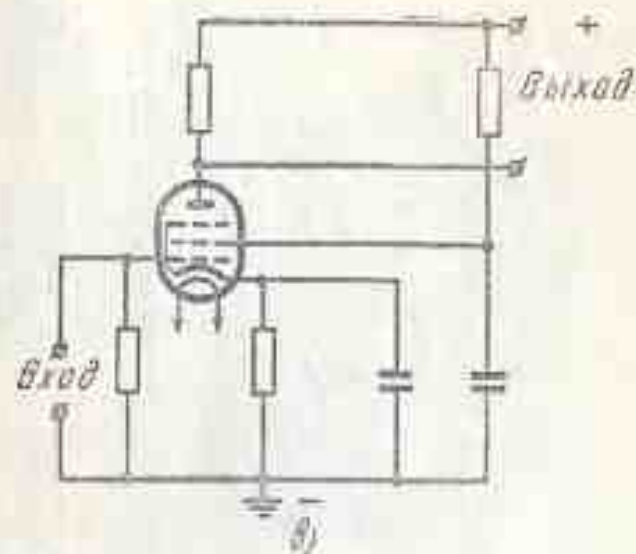
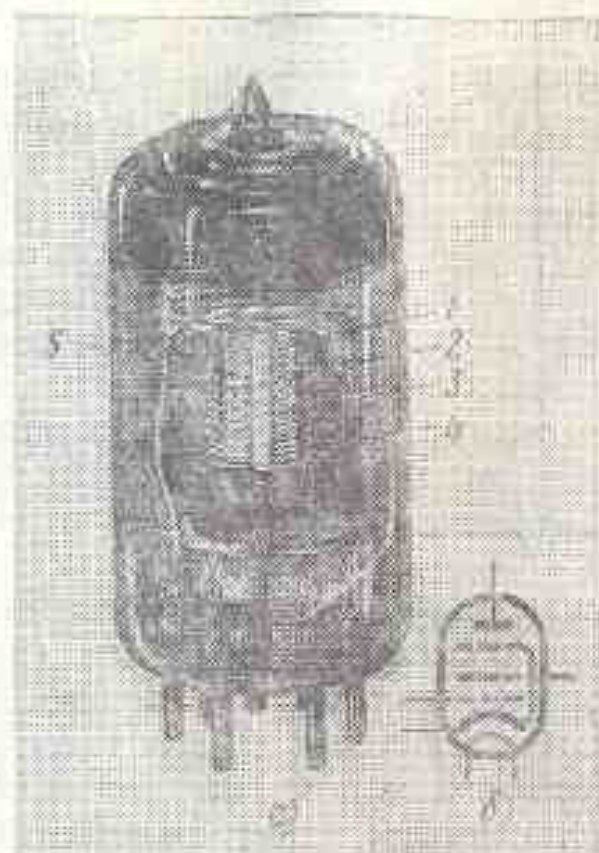


Рис. 190. Пентод:

а — устройство, б — условное обозначение, в — схема включения; 1 — управляющая сетка, 2 — экранирующая сетка, 3 — защитная сетка, 4 — катод, 5 — анод

собой комбинацию из нескольких ламп. В одном баллоне такой лампы помещено несколько комплектов деталей ламп рассмотренных типов. В связи с этим такие лампы имеют двойное наименование: двойной диод — триод, двойной триод и т. д. Как правило, в таких лампах имеются общая нить накала и один катод, но иногда делают и несколько катодов. Условное обозначение таких ламп приведено на рис. 191.

Применение комбинированных ламп позволяет вместо нескольких обычных ламп использовать одну комбинированную и тем самым уменьшить размеры радиоаппаратуры.

Многосеточные лампы имеют разное количество сеток, из них две управляющие, к которым подводят переменное напряжение разной частоты. В связи с этим появляется возможность в анодной цепи лампы получить ток, частота которого отличается от частоты токов, подведенных к сеткам лампы.

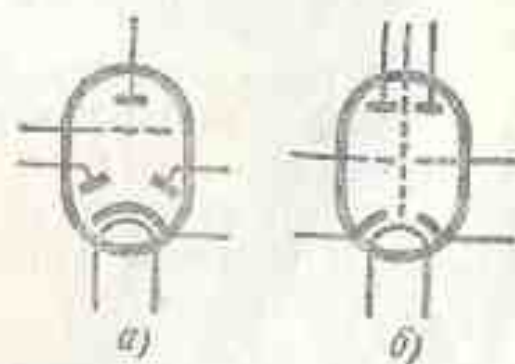


Рис. 191. Условное обозначение комбинированных ламп: а — двойной диод-триод, б — двойной триод

Рис. 189. Лучевой тетрод: а — устройство, б — условное обозначение, в — схема включения; 1 — баллон, 2 — анод, 3 — лучеобразующие электроды, 4 — экранирующая сетка, 5 — управляющая сетка, 6 — катод, 7 — цоколь, 8 — штырек, 9 — ключ

Этот процесс называется *преобразованием частоты*. Остальные сетки многосеточных ламп в зависимости от их использования соединяются по-разному.

§ 141. ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВАЯ ТРУБКА. ОСЦИЛЛОГРАФ

Для наблюдения, записи, измерений и контроля различных изменяющихся процессов в устройствах автоматики, телемеханики и других областях техники применяют осциллографы (рис. 192). Основной частью осциллографа является электроннолучевая трубка — электровакуумный прибор, в наиболее простом виде предназначенный для преобразования электрических сигналов в световые.

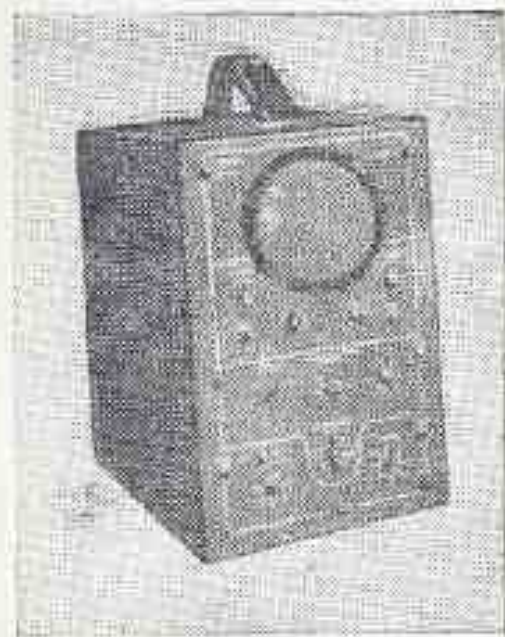


Рис. 192. Внешний вид осциллографа

Рассмотрим, как отклоняется электрон и электронный луч в электрическом поле электроннолучевой трубки осциллографа.

Если электрон поместить между двумя параллельными пластинами (рис. 193, а), имеющими разноименные электрические заряды, то под действием электрического поля, возникающего между пластинами, электрон отклонится, так как он заряжен отрицательно. Он отталкивается от пластины А, имеющей отрицательный заряд, и притягивается к пластине В, имеющей положительный электрический заряд. Движение электрона будет направлено вдоль линий поля.

Когда в поле между пластинами попадает движущийся со скоростью V электрон (рис. 193, б), то на него действуют не только силы поля F , но и сила F_1 , направленная по его движению. В результате действия этих сил электрон отклонится от своего прямолинейного пути и будет перемещаться по линии OK — по диагонали.

Если между пластинами пропустить узкий пучок движущихся электронов — электронный луч (рис. 193, в), он под действием электрического поля отклонится. Угол отклонения электронного луча зависит от скорости движения электронов, из которых состоит луч, и величины напряжения, создающего электрическое поле между пластинами.

Каждая электроннолучевая трубка (рис. 194) представляет собой баллон, из которого выкачан воздух. Коническая часть внутренней поверхности баллона покрыта графитом и называется *аквадагом*. Внутри баллона 3 помещается электронный прожектор 8 — электронная пушка, отклоняющие пластины 4 и 5 и экран 6. Электронный прожектор трубки состоит из подогревного

катода, который излучает электроны, и системы электродов, образующих электронный луч. Этот луч, испускаемый катодом трубки, перемещается с большой скоростью к экрану и по существу является электрическим током, направленным в сторону, обратную движению электронов.

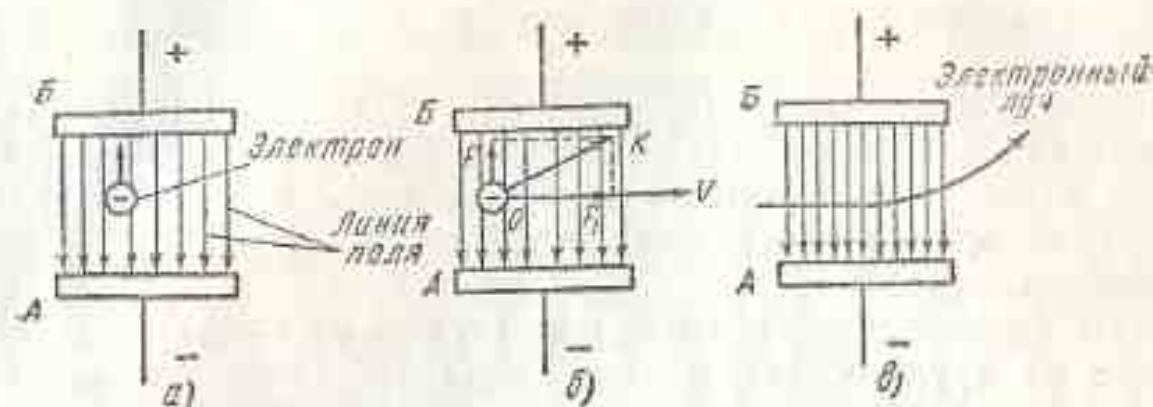


Рис. 193. Схема отклонения электрона и электронного луча в электрическом поле:

а — отклонение электрона, б — отклонение движущегося электрона со скоростью V , в — отклонение электронного луча

Катод представляет собой никелевый цилиндр, торец которого покрыт слоем оксида. Цилиндр надет на тонкостенную керамическую трубку, а внутри нее для подогрева катода помещается нить из вольфрама, выполненная в виде спирали.

Катод расположен внутри управляющего электрода 7, имеющего форму стаканчика. В дне стаканчика сделано небольшое отверстие, через которое проходят электроны, вылетающие из ка-

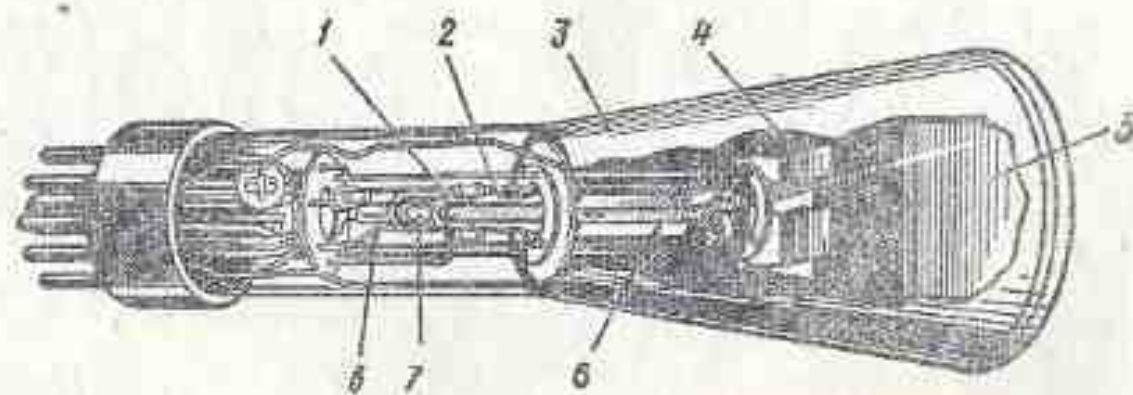
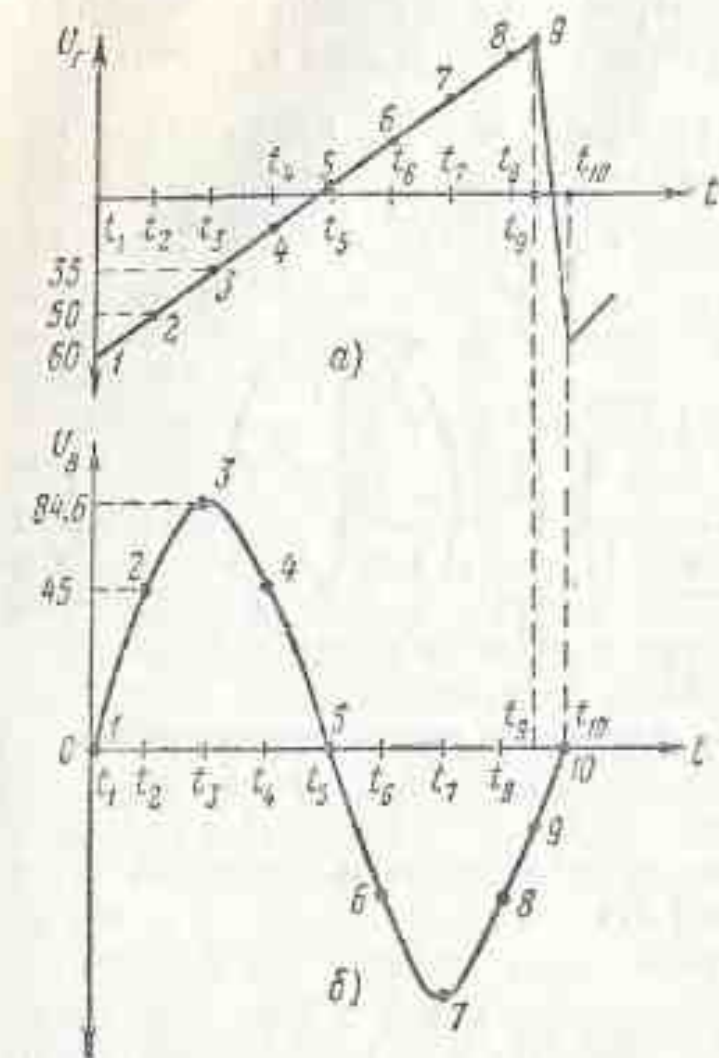


Рис. 194. Электроннолучевая трубка

туда; это отверстие называется *диафрагмой*. На управляющий электрод подается небольшое отрицательное напряжение (порядка нескольких десятков вольт) по отношению к катоду. Оно создает электрическое поле, действующее на электроны, вылетающие с катода так, что они собираются в узкий луч, направленный в сторону экрана трубки. Точка пересечения траекторий полета электронов называется *первым фокусом трубки*. Увеличивая отрицательное напряжение на управляющем электроде, можно часть

Это напряжение дает электронный генератор пилообразных импульсов, который смонтирован внутри осциллографа. Под действием пилообразного напряжения электронный луч перемещается горизонтально по экрану. За время $t_1 - t_8$ луч перемещается по экрану слева направо, а за время $t_9 - t_{10}$ быстро возвращается в исходное положение, затем вновь движется слева направо и т. д.



Выясним, как можно увидеть на экране электроннолучевой трубки осциллографа форму кривой мгновенных значений напряжения, подаваемого на вертикально отклоняющие пластины. Допустим, что к горизонтально отклоняющим трубкам подано пилообразное напряжение с амплитудой 60 в и с периодом изменения в 1/50 сек.

На рис. 196, б показан один период синусоидального напряжения, форму кривой которого мы хотим увидеть, а в круге (рис. 196, в) показано результирующее перемещение электронного луча на экране трубки осциллографа.

Напряжения в одни и те же мгновения имеют на верхних двух графиках одинаковые обозначения.

В момент времени t_1 пилообразное напряжение (U_r), отклоняющее электронный луч по горизонтали, равно 60 в, а напряжение на вертикальных пластинах U_n равно нулю и на экране светится точка O_1 . В момент времени t_2 напряжение $U_r = -50$ в, а напряжение $U_n = 45$ в. За время, равное $t_2 - t_1$, электронный луч переместится в положение O_2 по линии

$O_1 - O_2$. В момент времени t_3 напряжение $U_r = 35$ в, а напряжение $U_n = 84,6$ в. За время $t_3 - t_2$ луч переместится в точку O_3 по линии $O_2 - O_3$ и т. д.

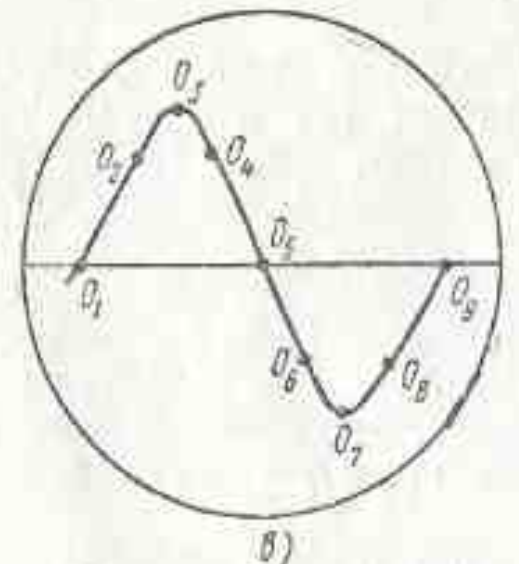


Рис. 196. Образование изображения на экране электроннолучевой трубки: а — график пилообразного напряжения, подаваемого на горизонтально отклоняющие пластины, б — график напряжения, подаваемого на вертикально отклоняющие пластины, в — график напряжения на экране трубки

$O_1 - O_2$. В момент времени t_3 напряжение $U_r = 35$ в, а напряжение $U_n = 84,6$ в. За время $t_3 - t_2$ луч переместится в точку O_3 по линии $O_2 - O_3$ и т. д.

Процесс воздействия электрических полей, создаваемых обеими парами отклоняющих пластин, на электронный луч будет продолжаться, и луч будет отклоняться далее по линии $O_3 - O_4 - O_5$ и т. д.

За время $t_{10} - t_9$ электронный луч быстро отклонится влево (произойдет обратный ход луча), а затем процесс будет повторяться. Исследуемое напряжение изменяется периодически, поэтому электронный луч будет многократно перемещаться по одному и тому же пути, в результате чего будет видна довольно яркая линия, по форме совпадающая с формой кривой напряжения, поданного на вертикально отклоняющие пластины трубки.

Так как период (и частота) напряжений пилообразных импульсов развертки и исследуемого напряжения равны, то синусоида на экране будет неподвижна. Если частота этих напряжений разная и не кратная друг другу, то изображение будет перемещаться вдоль экрана трубки.

При подключении к обеим парам отклоняющих пластин двух синусоидальных напряжений одинаковых амплитуд и частот, но сдвинутых по фазе на 90° , на экране трубки будет видна окружность. Таким образом, с помощью осциллографа можно наблюдать и исследовать различные процессы, происходящие в электрических цепях. Кроме генератора пилообразных импульсов, осциллограф имеет усилители для усиления напряжения, подаваемого на пластины вертикального отклонения луча, и пилообразного напряжения, подаваемого на пластины горизонтального отклонения.

Контрольные вопросы

1. Что называется термоэлектронной эмиссией?
2. Для чего в электронной лампе служит катод?
3. Какая электронная лампа называется диодом?
4. При каких условиях в цепи диода протекает ток?
5. Что называется крутизной характеристики диода?
6. Чем отличается выпрямленное напряжение до фильтра при однополупериодном и двухполупериодном выпрямлении?
7. Как устроена трехэлектронная лампа?
8. Как изображается на схеме лучевой тетрод?
9. Для чего служит электроннолучевая трубка?
10. Как происходит отклонение электронного луча в электроннолучевой трубке?

ГЛАВА XIV
ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ПРИБОРЫ

§ 142. ИОННЫЕ ПРИБОРЫ

Ионизация газа и электрический разряд. Ионными или газоразрядными приборами называются приборы, наполненные разреженным газом, в которых электрический ток создается не только под действием направленного перемещения свободных электронов, но и вследствие движения заряженных частиц газа — ионов.

Прежде чем приступить к объяснению устройства и работы газоразрядных приборов, рассмотрим процесс прохождения электрического тока в газе.

В обычных условиях в газе имеется весьма незначительное количество электрически заряженных частиц — свободных электронов и ионов и он представляет собой диэлектрик, так как преобладающее большинство атомов и молекул газа является электрически незаряженными — нейтральными.

Чтобы газ стал проводником, в нем должно быть значительное количество заряженных частиц — ионов. Процесс образования ионов в газе называется *ионизацией*.

Ионизация газа может произойти двумя путями: под действием внешнего влияния — нагревания лучистой энергией и под действием электрического поля, в котором находится газ.

Ионизация атомов и молекул газа заключается в том, что от них отрывается один или несколько электронов; при потере электронов они становятся *положительными* ионами. Оторвавшиеся свободные электроны вместе с положительными ионами сами участвуют в создании тока, протекающего в газе.

Когда электрон присоединяется к нейтральной молекуле газа, то вследствие избытка электронов эта молекула газа становится отрицательно заряженным ионом. Таким образом, при ионизации в газе образуются не только положительные, но и отрицательные ионы.

Одновременно с процессом ионизации газа происходит и обратное явление, при котором ионы превращаются в нейтральные атомы.

Превращение ионов газа в нейтральные атомы называется *рекомбинацией*.

Рекомбинация атомов приводит к тому, что в газе становится меньше заряженных ионов, поэтому его электропроводность понижается, а электрическое сопротивление возрастает.

Допустим, что в газе с большой скоростью перемещается электрон, который столкнулся при своем движении с нейтральной молекулой и выбил из нее один электрон. Вследствие этого в газе появляются два свободных электрона и молекула становится положительным ионом.

Если теперь эти два электрона при своем движении попадут в две другие молекулы и каждый также выбьет из них по электрону, то появится уже четыре свободных электрона и три атома станут положительными ионами.

Четыре электрона, в свою очередь, произведут ионизацию еще четырех атомов газа. В результате этого появится уже восемь электронов и семь положительных ионов. Таким образом, если этот процесс будет продолжаться, то количество заряженных частиц в газе будет увеличиваться лавинообразно. Рассмотренный процесс ионизации называется *ударной ионизацией*.

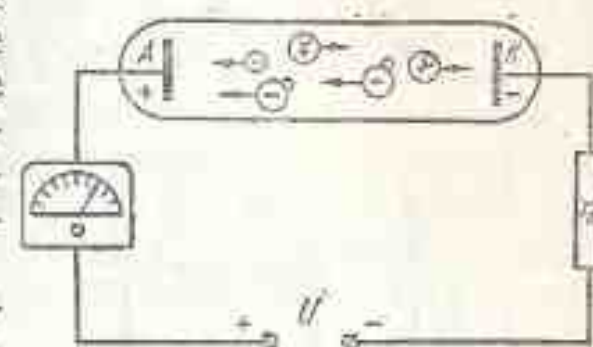
Если к пластинам *A* и *K* газонаполненной трубки (рис. 197) подвести достаточно высокое напряжение U , то под действием сильной ионизации газ теряет свои электроизоляционные свойства — становится проводником.

В ионизированном газе под влиянием сил внешнего электрического поля возникает направленное перемещение электронов и ионов и между пластинами потечет электрический ток — начнется электрический разряд. При этом выделяется энергия, под действием которой происходит свечение ионизированного газа.

В процессе электрического разряда, под влиянием электрического поля, создаваемого приложенным напряжением, отрицательные ионы и электроны перемещаются к положительно заряженной пластине. Положительные ионы движутся в противоположном направлении, притягиваясь к пластине, имеющей отрицательный электрический заряд. Таким образом, электрический ток в газе представляет собой направленное движение положительно и отрицательно заряженных частиц (ионов и электронов) в противоположных направлениях.

Глеющий разряд. В технике используются различные виды электрических разрядов в газе. Рассмотрим электрический разряд в газе, носящий название *глеющего*.

При электрическом разряде повышение напряжения между электродами газонаполненной колбы до определенной величины



- ⊖ Электрон
- ⊖ Отрицательный ион
- ⊕ Положительный ион

Рис. 197. Схема, поясняющая, как происходит электрический разряд в газонаполненной трубке

приводит к интенсивной ионизации газа, при которой ток в газе резко увеличивается и достигает величины, иногда в тысячи раз больше первоначальной. Такой разряд называется тлеющим.

Электрический ток в газе в данном случае ограничивается сопротивлением r_0 , которое включается в цепь последовательно.

Тлеющий электрический разряд сопровождается довольно сильным свечением газа. Процесс образования тлеющего разряда протекает так.

Допустим, что к аноду газонаполненной трубки подведены положительное, а к катоду — отрицательное напряжения. Электроны и отрицательные ионы газа будут перемещаться к аноду, а положительно заряженные ионы — в противоположном направлении, т. е. к катоду. При этом положительные ионы, попадая на катод, ударяются о его поверхность, нагревают его и выбивают из него вторичные электроны, которые, в свою очередь, двигаясь к аноду, ионизируют атомы газа и вместе с тем увеличивают поток электронов, а следовательно, и ток в цепи анода.

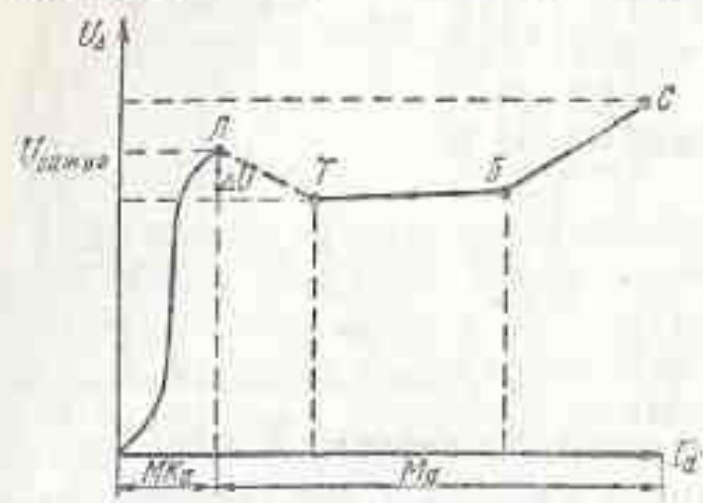


Рис. 198. Характеристика тлеющего разряда

Тлеющий разряд в газе может появиться и существовать лишь при определенном напряжении между электродами. Если напряжение меньше необходимого, то положительные ионы, летящие с небольшой скоростью и ударяющиеся о поверхность катода, не сумеют выбить из него электроны, в результате чего процесс ионизации ослабнет и может прекратиться.

Напряжение, при котором образуется тлеющий разряд, называется *напряжением зажигания*.

Напряжение зажигания зависит от ряда причин, и в том числе от состава и давления газа, расстояния между электродами, а также от материала и формы электродов.

На графике (рис. 198) показана характеристика тлеющего разряда. При увеличении напряжения от нуля до некоторого значения в приборе тлеющего разряда протекает весьма малый ток (микроамперы). Когда напряжение оказывается равным напряжению зажигания $U_{\text{заж}}$ (точка Л), возникает тлеющий разряд. При напряжении зажигания резко возрастает ток (миллиамперы) и значительно уменьшается напряжение на несколько вольт (ΔU).

Понижение напряжения связано с тем, что с увеличением тока возрастает падение напряжения на внутреннем сопротивлении прибора и на ограничивающем сопротивлении.

До момента зажигания внутреннее сопротивление ионного прибора очень велико и поэтому ток в его цепи ничтожно мал. При зажигании внутреннее сопротивление газового промежутка при-

бора резко уменьшается, а ток в цепи значительно увеличивается.

Участок ЛТ на графике соответствует процессу зажигания. После процесса зажигания напряжение в приборе с тлеющим разрядом остается почти постоянным (участок ТБ). Этот режим работы прибора называется *нормальным*.

Когда через прибор протекает малый ток, свечение возникает не вдоль всей поверхности катода, а лишь у части его. По мере возрастания тока рабочая часть катода увеличивается. При нормальном режиме разряда ток достигает максимальной величины (точка Б), вся поверхность катода охватывается свечением, т. е. становится рабочей. Участок БС характеристики соответствует такому режиму работы катода, при котором дальнейшее увеличение напряжения приводит к увеличению тока и к возрастанию плотности тока на катоде. В этом режиме усиливается яркость свечения газа около катода.

Дальнейшее увеличение напряжения приводит к возникновению *дугового разряда*, который опасен для прибора тлеющего разряда. Таким образом, появление тлеющего разряда можно обнаружить по резкому увеличению тока, измеряемого миллиамперметром, по незначительному уменьшению напряжения, а также по свечению газа.

При дуговом разряде свечение газа становится еще более интенсивным, а плотность тока значительно превышает плотность тока, возникающего при тлеющем разряде.

Дуговой разряд имеет много разновидностей. Он может появляться в виде электрической дуги, используемой не только в некоторых ионных приборах, но и в мощных прожекторах, а также при электросварке металлов.

Применяемый в технике искровой разряд также имеет сходство с дуговым разрядом. При таком разряде происходит кратковременный (импульсный) электрический разряд.

§ 143. НЕОНОВАЯ ЛАМПА

Неоновая лампа — это газоразрядная лампа (рис. 199), в которой образуется тлеющий электрический разряд. Она представляет собой баллон I из стекла, наполненный смесью газов неона, гелия и аргона.

Внутри баллона помещаются два металлических электрода 2 и 3, находящиеся на некотором расстоянии один от другого.

Электроды соединяются с цоколем лампы 4, а лампа — с сетью через патрон.

Неоновые лампы выбираются по напряжению сети (127—220 в), по напряжению, при котором возникает электрический разряд (60—550 в), а также по наибольшему допустимому току (0,2—30 ма).

Срок службы неоновых ламп 100—1000 ч. Они имеют длину 28—90 мм и диаметр 7—56 мм. Неоновые лампы можно включать

как в цепь переменного, так и постоянного тока. У ламп, включенных в цепь переменного тока, свечение наблюдается попеременно у обоих электродов и частота вспышек равна удвоенной частоте переменного тока. При включении их в цепь постоянного тока свечение наблюдается только у одного электрода.

Неоновая лампа светится и в том случае, когда к ней не подключен источник электрической энергии. Если поместить неоновую лампу в сравнительно сильное электрическое поле, то в ней начинается процесс ионизации, возникает электрический разряд и она начинает светиться.

Напряжение погасания неоновой лампы всегда меньше напряжения, необходимого для зажигания, на несколько единиц или десятков вольт. Неоновые лампы применяются как инди-

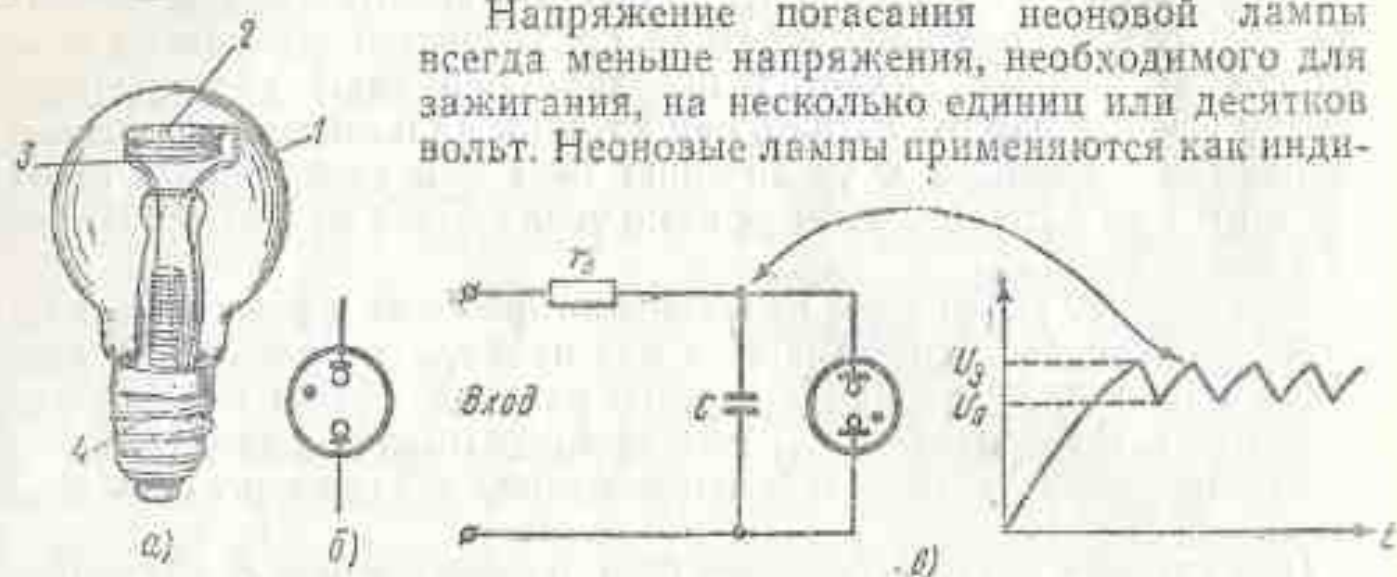


Рис. 199. Неоновая лампа:
а — устройство, б — условное обозначение, в — схема генератора

каторы, определяющие наличие постоянного или переменного напряжения. Их можно использовать для измерения величины напряжения. Если известно напряжение зажигания данной лампы, то при включении ее в электрическую цепь она будет светиться лишь в том случае, когда подаваемое напряжение будет не меньше напряжения зажигания.

Неоновую лампу применяют иногда в генераторах, создающих пилообразное напряжение. На рис. 199, в приведена схема генератора с неоновой лампой и график пилообразного напряжения. Лампа включена последовательно с сопротивлением r_0 и к ней параллельно подключен конденсатор C . При подключении напряжения к зажимам цепи конденсатор заряжается через сопротивление r_0 и напряжение на нем постепенно возрастает. Когда с течением времени напряжение конденсатора достигает значения U_0 , необходимого для зажигания неоновой лампы, последняя зажигается. После этого начинается разряд конденсатора через лампу, который продолжается до тех пор, пока напряжение на нем не понизится до напряжения погасания лампы U_1 . Тогда лампа гаснет и снова происходит подзарядка конденсатора.

Если напряжение конденсатора вторично достигнет значения U_0 , то лампа вновь загорится и конденсатор опять начнет разряжаться до момента, когда напряжение на конденсаторе станет равным U_1 , и лампа вновь погаснет. Далее процесс будет повторяться.

Частота колебаний напряжения в цепи такого генератора зависит от величины емкости C , сопротивления r_0 и напряжения зажигания и гашения лампы, а также от напряжения источника электрической энергии, подводимого к генератору. Изменением величин r_0 и C можно изменить частоту генератора от нескольких герц до десятков килогерц.

Неоновая лампа используется на производстве в приборах для определения числа оборотов вращающихся осей и валов механизмов и станков. Такие приборы называются *стробоскопическими тахометрами*.

Работа этих приборов основана на стробоскопическом эффекте. Сущность такого эффекта заключается в том, что деталь, скорость которой хотят определить, освещается неоновой лампой, зажигающейся с определенной частотой. Когда частота вспышек равна или кратна скорости вращения детали, то она в свете вспышек кажется неподвижной. Допустим, что мы хотим определить скорость вращения вала. Для этого на его торец необходимо наклеить стробоскопический диск, разделенный на четыре сектора: два черных и два белых.

Пусть в ход вал, включаем неоновую лампу, питаемую переменным током определенной частоты, и освещаем ею стробоскопический диск. Если при этом диск, наклеенный на вал, будет перемещаться в сторону его вращения, то это укажет на его повышенную скорость. Когда перемещение стробоскопического диска направлено в сторону, обратную вращению вала, то скорость его мала. Если диск будет казаться неподвижным, это будет означать, что скорость вала нормальная. Таким образом, с помощью такого устройства можно быстро определить скоростной режим того или иного механизма и принять меры для его регулирования.

§ 144. ГАЗОСВЕТНАЯ ЛАМПА

Газосветная лампа (рис. 200) представляет собой стеклянную трубку 1, внутренние стенки которой покрыты тонким слоем люминофора — состава, светящегося при облучении. В качестве люминофора обычно используются сернистые соединения цинка, магния, кальция и стронция. Воздух из трубки лампы удален, а ее пространство заполнено парами ртути и газом аргоном.

На концах трубки находится два электрода 2 в виде проволочных нитей, к которым подводится электрическая энергия от сети.

В схему включения газосветной лампы включается дроссель 6, стартер 7 и конденсатор 5. Дроссель представляет собой катушку со стальным сердечником. Стартер выполнен в виде миниатюрной неоновой лампы с двумя электродами 3 и 4, которые в холодном состоянии не соприкасаются. Электрод 4 представляет собой биметаллическую пластину. Напряжение зажигания стартера ниже напряжения зажигания газосветной лампы.

При включении лампы в сеть под действием приложенного напряжения между электродами неоновой лампы (стартера) воз-

никает электрический разряд, который быстро нагревает электрод 4, и он, изгибаясь, соединяется с электродом 3. Вследствие этого разряд в неоновой лампе прекращается и электроды 3 и 4 размыкаются. За время разряда, который происходит в стартере, успевают нагреться электроды 2 газосветной лампы, и в этот момент происходит ее зажигание, а в парах ртути и газе лампы возникает электрический разряд. При этом газ, находящийся в

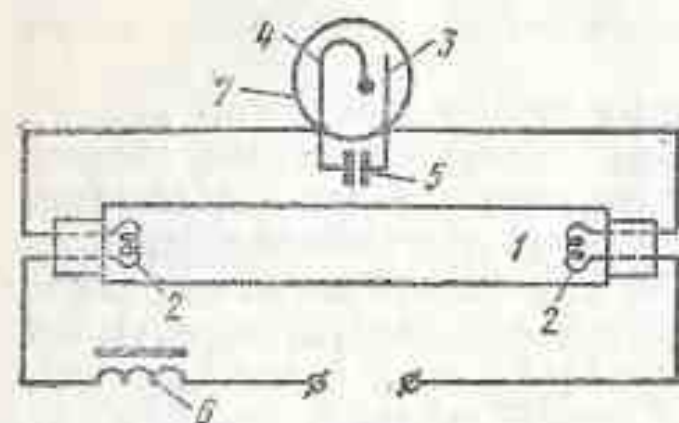


Рис. 200. Газосветная лампа

трубке лампы, начинает светиться, излучая частично видимый фиолетовый цвет и много невидимых ультрафиолетовых лучей. Эти невидимые лучи попадают на люминофор, которым покрыты внутренние стенки трубки, и преобразуются в видимый свет, близкий по спектральному составу к дневному. По этой причине такие газосветные лампы называют лампами дневного света. Они

дают ровный, приятный для глаз свет.

Эти лампы примерно в два раза экономичнее обычных электрических ламп накаливания и обладают в 4—5 раз большим сроком службы.

Они получают все большее распространение для освещения жилых помещений, предприятий, улиц, культурных и бытовых учреждений.

Специальные газосветные лампы применяют в сельском хозяйстве для облучения животных и птиц, что приводит к повышению их продуктивности, а также для облучения рассады овощей и растений, благодаря чему значительно ускоряется их рост.

§ 145. СТАБИЛИТРОН

Стабилитрон (рис. 201) — это двухэлектродная газоразрядная лампа, широко используемая для поддержания неизменного (стабильного) напряжения $U_{ст}$. Стабилитрон также называется стабилivolтом. Он состоит из стеклянного баллона 1, который заполнен под небольшим давлением смесью газов неона, аргона и гелия. Внутри баллона помещается катод 2 цилиндрической формы, изготовленный из никеля или стали.

Анод 3 стабилитрона выполнен в виде стержня и расположен в центре катода. Внутреннюю поверхность катода покрывают активным слоем. Это необходимо для того, чтобы при попадании на катод положительных ионов получилась значительная эмиссия вторичных электронов. Электроды соединяются со штырьками цоколя лампы. При подаче положительного напряжения на анод стабилитрона в нем возникает тлеющий разряд.

Для использования стабилитрона в качестве стабилизатора

напряжения его следует включить так, как показано на схеме (рис. 201, в).

Последовательно с лампой включается ограничительное сопротивление и источник электрической энергии. Приемник, потребляющий неизменное (стабилизированное) напряжение, подсоединяется к стабилитрону параллельно.

Напряжение, подводимое к стабилитрону $U_{ист}$, распределяется следующим образом: часть его поглощается в ограничительном сопротивлении r_0 , а другая часть приходится на стабилитрон. Таким образом, напряжение источника электрической энергии, питающего стабилитрон, должно быть больше значения неизменного (стабилизированного) напряжения, которое обеспечивает стабилитрон, и не меньше напряжения, необходимого для его зажигания.

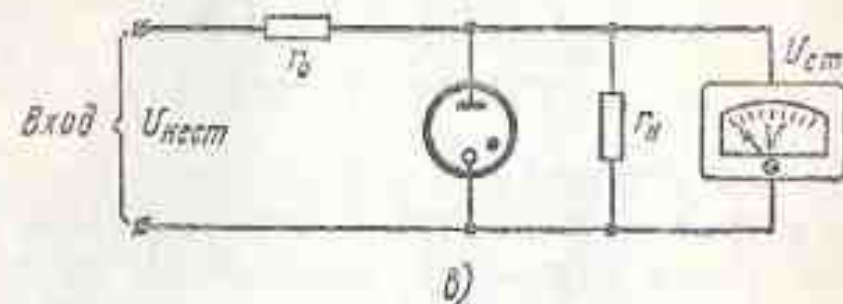
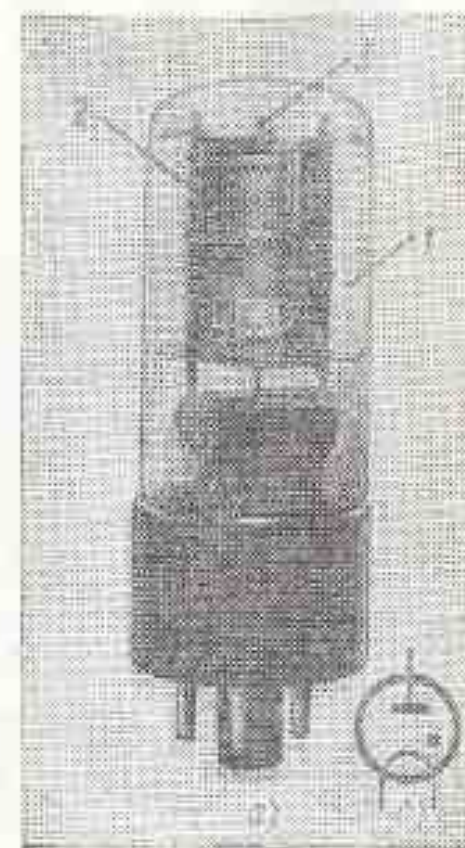


Рис. 201. Стабилитрон:

а — устройство, б — условное обозначение, в — схема включения

Допустим, что напряжение источника электрической энергии изменяется, а приемник, подключенный к стабилизатору, может работать только при неизменном напряжении.

Рассмотрим, как происходит процесс стабилизации напряжения. Когда напряжение источника электрической энергии повышается, в цепи стабилизатора и ограничительного сопротивления возрастает ток. Так как внутреннее сопротивление стабилитрона уменьшается пропорционально увеличению силы тока в его цепи, то напряжение на его зажимах остается неизменным, а напряжение $U = Ir_0$ на зажимах постоянного ограничительного сопротивления возрастает.

При уменьшении напряжения источника электрической энергии, подключенного к стабилизатору, в цепи уменьшается сила тока. Соответственно увеличивается сопротивление стабилитрона и вновь напряжение на его зажимах остается неизменным, а напряжение на ограничительном сопротивлении уменьшается.

Таким образом, при нормальном режиме работы стабилитрона путем изменения силы тока автоматически поддерживается неизменное напряжение на нагрузке, подключенной к его зажимам.

Стабилитрон также стабилизирует напряжение на нагрузке при изменении величины этой нагрузки, т. е. силы тока в ней. Основными показателями, по которым выбираются стабилитроны, являются: напряжение стабилизации, напряжение зажигания, наибольший и наименьший токи.

Напряжение стабилизации несколько меньше напряжения зажигания (в пределах от единицы до нескольких десятков вольт). Так, стабилитрон типа СГ4С рассчитан на стабилизируемое напряжение в 150 в. Наименьший ток его 5 ма, наибольший ток 30 ма.

§ 146. ТИРАТРОН

В различных устройствах автоматики большое распространение получил управляемый ионный прибор — тиратрон (рис. 202, а).

Тиратрон представляет собой триод, наполненный смесью инертных газов. В стеклянном баллоне тиратрона помещаются анод, катод и управляющий электрод — сетка. Катод нагревается

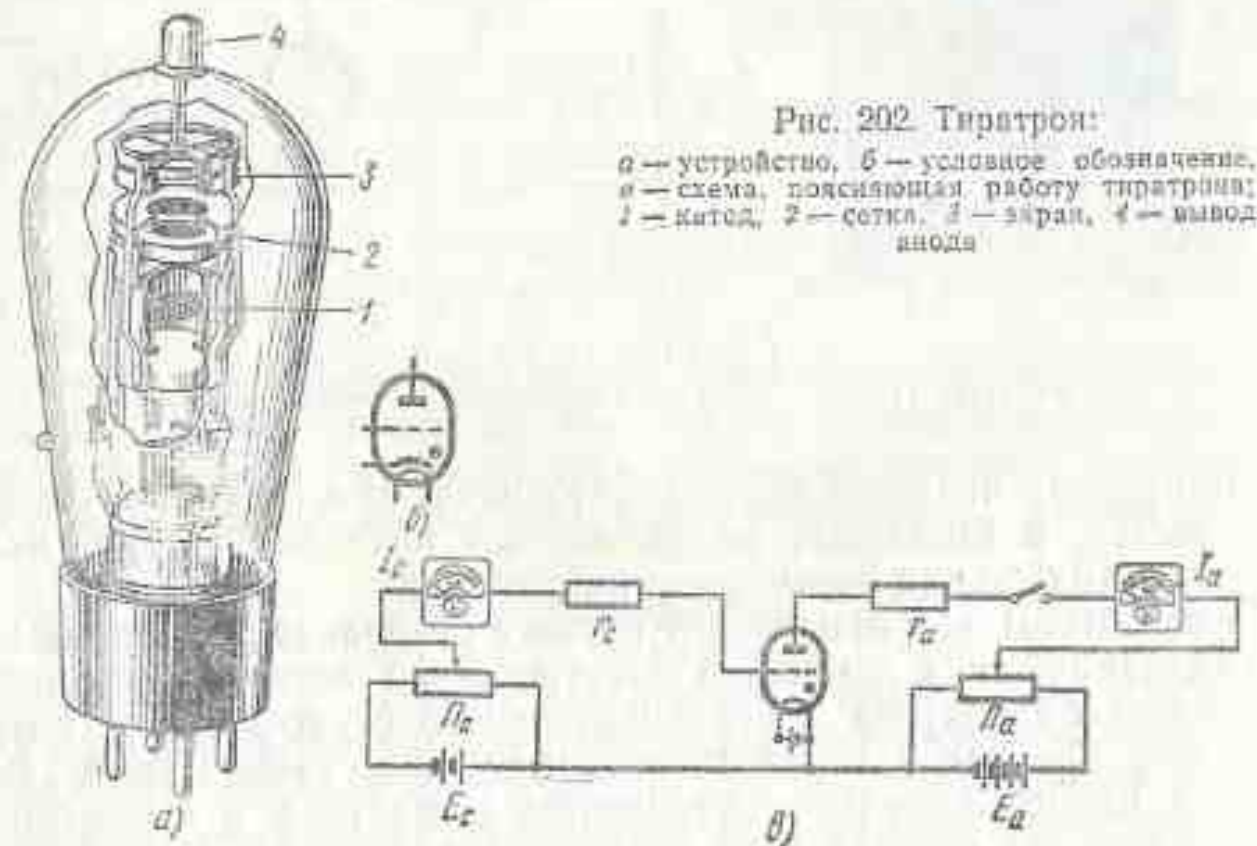


Рис. 202 Тиратрон:
а — устройство, б — условное обозначение,
в — схема, поясняющая работу тиратрона;
1 — катод, 2 — сетка, 3 — экран, 4 — вывод анода

электрическим током. На анод подается положительное напряжение, на сетку — отрицательное напряжение, удерживающее (запирающее) электроны в промежутке катод-сетка.

Сетка тиратрона в отличие от сетки триода не позволяет изменить силу анодного тока. Вследствие наличия газа в колбе тиратрона его с помощью сетки можно лишь отпереть — зажечь, но нельзя погасить. После зажигания тиратрона сетка теряет свое управляющее свойство.

Допустим, что на сетку тиратрона (рис. 202, в) через потенциометр Π_c подан большой отрицательный потенциал, а анод имеет по отношению к катоду положительный потенциал. Электрическое поле сетки будет препятствовать движению электронов к аноду.

Постепенное уменьшение запирающего отрицательного напряжения на сетке (путем перемещения движка потенциометра вправо) приведет к появлению небольшого тока в цепи анода тиратрона. При дальнейшем уменьшении этого напряжения большое количество электронов с высокой скоростью будут двигаться к аноду. На своем пути они станут ионизировать атомы газа. Движение ионов газа, в свою очередь, ускоряется электрическим полем анода и катода, при столкновениях с нейтральными атомами они образуют новые ионы в еще большем количестве. Такая лавинообразная ионизация сопровождается скачкообразным нарастанием силы анодного тока и зажиганием тиратрона.

Для ограничения силы тока в цепи анода включают ограничительное сопротивление.

С момента зажигания тиратрона и возникновения электрического разряда в нем сетка теряет свое управляющее свойство. Это связано с тем, что отрицательный заряд сетки оказывается окруженным оболочкой из положительных ионов, которые нейтрализуют его действие.

Прекращение разряда в тиратроне можно осуществить снятием анодного напряжения. За время, которое длится до 1 мсек, в лампе происходит процесс рекомбинации, после чего сетка вновь приобретает управляющее действие.

В цепи сетки тиратрона образуется сеточный ток I_c , который является нежелательным. Этот ток создается электронами и положительно заряженными ионами. При положительном напряжении на сетке она притягивает к себе электроны и в ее цепи появляется электронный ток.

При отрицательном напряжении на сетке к ней притягивается некоторое количество положительных ионов и в цепи сетки возникает ионный сеточный ток. Так как ионы имеют большую, чем электроны, массу, то они менее подвижны и поэтому ионный ток в цепи сетки меньше электронного сеточного тока.

Для ограничения бесполезного сеточного тока в ее цепь включают ограничительное сопротивление.

В практике применяют разнообразные марки тиратронов. Они отличаются: напряжением накала, напряжением возникновения электрического разряда, наибольшим отрицательным запирающим напряжением сетки, током накала, средним током анода, временем разогрева катода, сопротивлением в цепи сетки и размерами.

Так, тиратрон ТГ1-2,5/4 с оксидным катодом прямого накала имеет следующие основные данные: среднее значение тока анода 2,5 а, напряжение накала 5 в, напряжение возникновения электрического разряда 140 в, наибольшее отрицательное напряжение сетки 100 в, ток накала 142 а, время разогрева 1 мин, сопротивление в цепи сетки 0,001—0,1 Мом.

Работа ртутного выпрямителя основана на использовании автоэлектронной эмиссии и ионизации газа паров ртути.

Ртутные выпрямители делятся на стеклянные и металлические.

Стеклянный однофазный ртутный выпрямитель (рис. 203) имеет колбу из молибденового стекла, из которой выкачан воздух. В колбу впаяны два стальных или графитных электрода A_1 и A_2 , которые являются главными анодами выпрямителя. Нижняя часть колбы

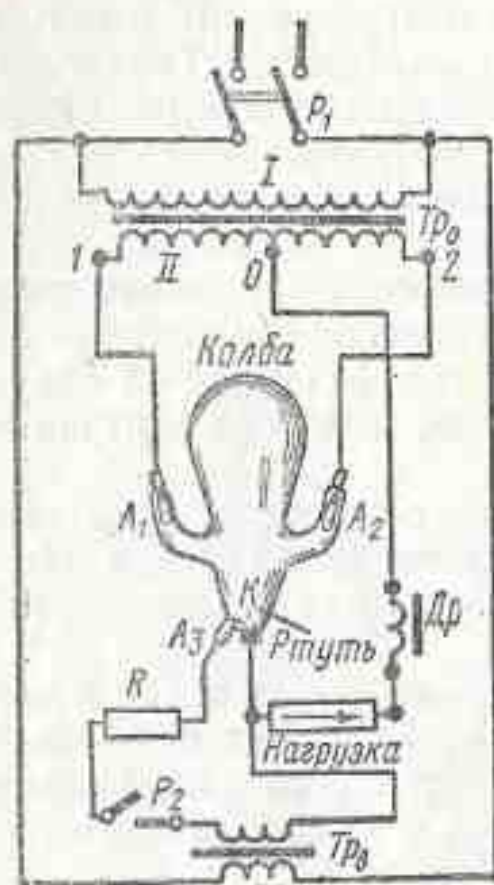


Рис. 203. Принципиальная схема стеклянного ртутного выпрямителя

заполнена ртутью, которая служит катодом выпрямителя. В ртути помещается металлический стержень, впаянный в стекло. Рядом с ним в колбу впаян стеклянный отросток, в котором также находится ртуть. Здесь размещается анод зажигания A_3 .

Аноды A_1 и A_2 соединены с концами вторичной обмотки основного трансформатора Tr_0 . К катоду K подключают нагрузку. Провод, идущий от нагрузки, соединяют через дроссель Dr со средней точкой O вторичной обмотки трансформатора Tr_0 .

Чтобы ртутный выпрямитель осуществлял выпрямление переменного тока, его необходимо возбудить. Для этого включают рубильники P_1 и P_2 и подают переменное напряжение на основной Tr_0 и вспомогательный Tr_n трансформаторы. Затем создают условия для того, чтобы ртуть катода соединилась с ртутью анода зажигания A_3 . При этом под действием напряжения вторичной обмотки вспомогательного трансформатора Tr_n электрический ток проходит через рубильники P_2 , сопротивление R , анод

зажигания A_3 и катод K .

Когда колбу возвращают в первоначальное положение, контакт между ртутью, окружающей катод K , и анодом зажигания A_3 разрывается, и в этом месте образуется электрическая дуга, а на ртути катода появляется небольшое сильно нагретое светлое катодное пятно. Это пятно является местом испарения ртути.

Вместе с тем вблизи поверхности ртути создается электрическое поле столь высокой напряженности, что оно вырывает свободные электроны с этой поверхности. Это так называемая автоэлектронная (или электростатическая) эмиссия. Электроны, освобожденные на катоде, летят к тому из анодов, который в данный момент имеет положительный потенциал по отношению к катоду (рис. 204). На своем пути электроны сталкиваются с молекулами паров ртути

и ионизируют их, т. е. отделяют от них электроны, превращая эти молекулы в положительные ионы. Ударяющие в катод положительные ионы поддерживают температуру катодного пятна.

Нетрудно понять, что дуга в колбе выпрямителя представляет собой поток быстро движущихся электронов от катода к аноду и относительно медленно движущихся (из-за своей большой массы) положительных ионов ртути в обратном направлении.

Когда на аноде вследствие изменения напряжения на концах вторичной обмотки трансформатора изменяется потенциал (вместо положительного создается отрицательный), дуга в колбе перебрасывается к тому из анодов, который в данный момент имеет положительный потенциал, и таким образом соединяет поочередно катод с каждым из анодов.

Дуга выполняет функцию практически безынерционного переключателя, соединяющего нагрузку то с одной, то с другой половиной обмотки трансформатора.

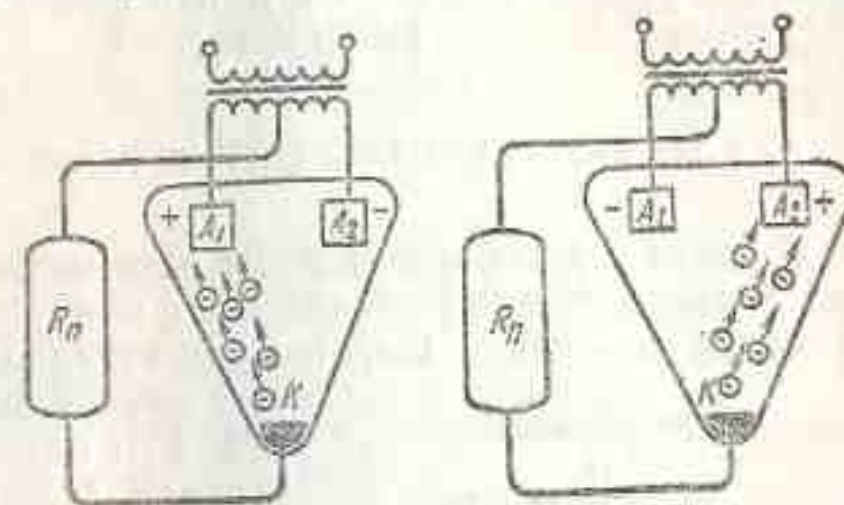


Рис. 204. Схема выпрямляющего действия дуги в колбе выпрямителя

Пусть в течение одного полупериода (см. рис. 203) напряжение, подаваемое со вторичной обмотки трансформатора Tr_0 на аноде колбы, имеет положительное значение на аноде A_1 и отрицательное на аноде A_2 . Тогда ток пройдет от точки 1 вторичной обмотки трансформатора через анод A_1 , катод, нагрузку (в направлении, указанном стрелкой), дроссель, среднюю точку вторичной обмотки и правую половину этой обмотки к минусу (точка 2). Через анод A_2 , имеющий отрицательный потенциал, ток протекать не будет.

В течение второго полупериода полярность напряжения на анодах колбы изменится. Тогда ток пройдет от точки 2 вторичной обмотки трансформатора Tr_0 , через анод A_2 , катод, нагрузку, дроссель, среднюю точку вторичной обмотки и левую половину этой обмотки к плюсу (точка 1). В следующие полупериоды процесс повторится и направление выпрямленного тока в нагрузке останется неизменным. Такой ртутный выпрямитель осуществляет двухполупериодное выпрямление переменного тока.

Стеклянные ртутные выпрямители изготовляют на различные напряжения (до 15 000 в) и разные токи.

При выпрямлении переменного тока большой мощности в ртутных выпрямителях выделяется значительное количество тепла. Поэтому вместо хрупких и непрочных стеклянных колб у мощных выпрямителей применены металлические.

Главные детали металлического ртутного выпрямителя: аноды,

катоды, анод зажигания и др. — имеют то же назначение, что и в стеклянном выпрямителе. Этот выпрямитель включается в схему также через два трансформатора — основной и вспомогательный.

Металлический выпрямитель оборудован водяным охлаждением. Металлические выпрямители изготовляют большой мощности на высокие напряжения и различные токи. Они питаются от трехфазной сети, поэтому являются многофазными.

Электрифицированные железные дороги, городские трамвайные сети, метрополитен получают постоянный ток от таких мощных ртутных выпрямителей, но в настоящее время они заменяются полупроводниковыми выпрямителями.

§ 148. ГАЗОРАЗРЯДНЫЙ СЧЕТЧИК РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В связи с распространением автоматического контроля различных производственных процессов с применением источников радиоактивных излучений широкое применение получил газоразрядный счетчик, регистрирующий эти излучения. Его работа основана на ионизирующем действии радиоактивного излучения.

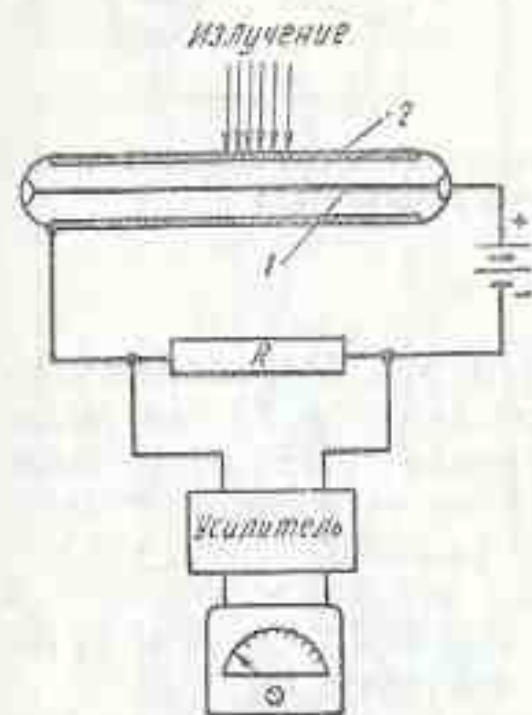


Рис. 205. Газоразрядный счетчик радиоактивного излучения:
1 — анод, 2 — катод

Газоразрядный счетчик (рис. 205) представляет собой стеклянный или металлический баллон с двумя электродами — внешним (катод) и внутренним (анод). Катодом является или металлический баллон, или проводящий слой, нанесенный на внутреннюю поверхность стеклянного баллона. Анодом служит тонкая металлическая проволока, натянутая внутри баллона вдоль его оси.

Счетчик обычно наполнен специальной смесью газов под давлением 100 мм рт. ст.

Когда газ внутри счетчика не ионизирован ядерными частицами, несмотря на приложенное к нему напряжение, ток между его электродами не протекает.

Как только газ внутри счетчика будет ионизирован попавшими в него ядерными частицами, в цепи счетчика появится электрический ток.

Источником ионизации газа могут быть гамма-, альфа- и бета-лучи, рентгеновское и ультрафиолетовое излучения.

Для работы счетчика используется такой режим, при котором ток в цепи счетчика пропорционален числу ионизирующих частиц. Этот режим называется «областью Гейгера» и используется для работы газоразрядных счетчиков. Последовательно со счетчиком

включается сопротивление порядка 1—10 Мом, являющееся нагрузкой, с зажимов которого снимаются импульсы напряжения. Частота следования импульсов пропорциональна числу частиц, вызывающих ионизацию.

Газоразрядный счетчик воспринимает ядерное излучение и превращает его в электрические импульсы. Эти импульсы попадают в регистрирующее устройство. Количество поступающих импульсов характеризует степень радиоактивности.

В практике применяют разнообразные типы счетчиков, которые реагируют на различные излучения. Они рассчитаны на разное рабочее напряжение, имеют различный срок службы, исчисляемый миллионами импульсов, а также разные размеры — длину и диаметр.

Контрольные вопросы

1. Какие приборы называются ионными?
2. Почему в обычных условиях газ является диэлектриком?
3. В чем заключается ионизация газа и под влиянием чего она происходит?
4. Как устроена и действует неоновая лампа?
5. Изобразите схему включения газосветной лампы и объясните назначение включенных в нее элементов.
6. Для чего применяют стабилитрон?
7. Как устроен тиратрон и каково назначение его сетки?
8. Как действует газоразрядный счетчик радиоактивных излучений?

ГЛАВА XV
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ

§ 149. СТРОЕНИЕ И ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Наряду с электронными лампами в устройствах электроники все шире используются полупроводниковые диоды и триоды.

Их работа основана на физических свойствах полупроводников — кристаллических твердых тел.

Характерной особенностью металлических проводников является наличие свободных электронов. В диэлектрике — изоляторе свободных электронов нет и поэтому он тока не проводит. Полупроводники получили свое название потому, что они обладают промежуточными свойствами между проводниками, имеющими большую электропроводность, и диэлектриками, которые тока не проводят.

К полупроводникам относятся такие химические элементы, как германий, кремний, селен и многие другие твердые вещества, обладающие кристаллическим строением, окислы металлов, сернистые соединения и соединения селена.

Основным свойством полупроводников является изменение их электропроводности под действием температуры, света, давления и при наличии незначительных примесей.

Другой особенностью полупроводников является то, что их электропроводность связана с перемещением в них не только отрицательных зарядов — электронов, но и положительных зарядов — дырок.

Рассмотрим строение типичного полупроводника — германия.

Германий является элементом четвертой группы периодической системы Менделеева и имеет во внешней оболочке (рис. 206) атома четыре валентных электрона, участвующих в химических реакциях и процессах электропроводности. Остальные электроны атомов германия тесно связаны с ядрами.

Каждый атом германия стремится образовать связи с четырьмя другими атомами. В такой ячейке кристалла атом расположен на одинаковом расстоянии от других атомов, находящихся в вершинах правильного многогранника — тетраэдра (см. рис. 206).

В образовании связей между атомами германия от каждого из них участвует по одному электрону. Таким образом, связь атома

германия с ближайшим соседним атомом осуществляется двумя электронами. Подобная связь называется двухвалентной. Несвязанных свободных электронов германий практически не имеет. Число свободных электронов в его атомах составляет примерно один электрон на 10 млрд. атомов.

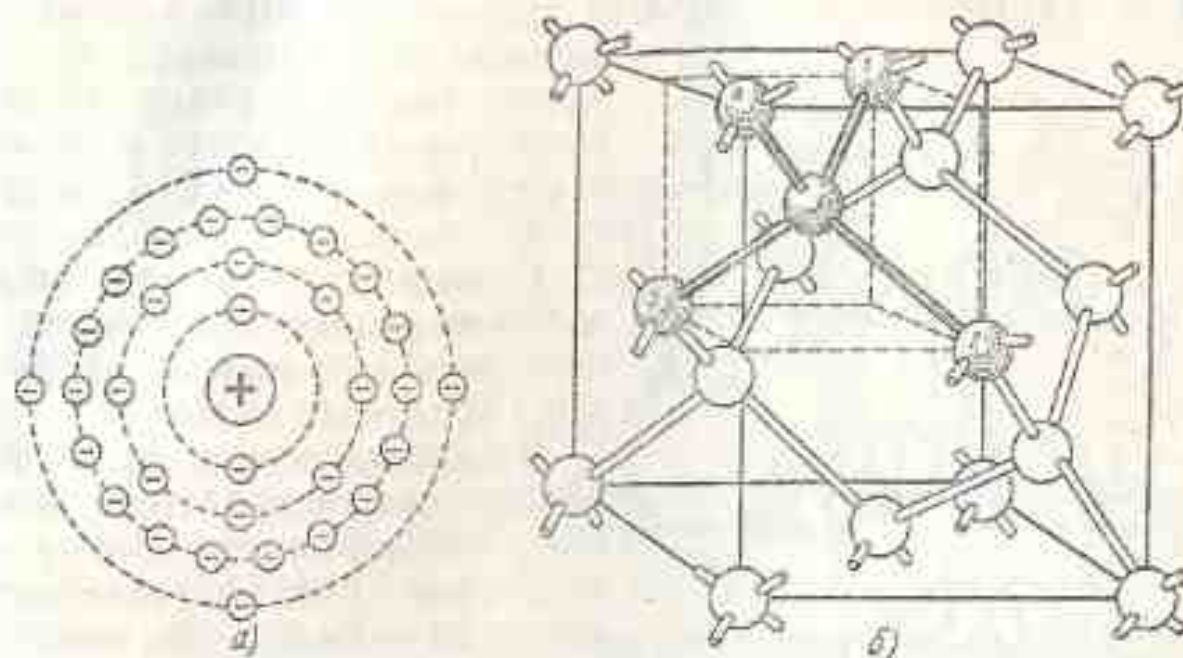


Рис. 206. Строение атома германия:
а — схема строения, б — связи германия с другими атомами

§ 150. ПОНЯТИЕ ОБ ЭЛЕКТРОННОЙ И ДЫРОЧНОЙ ПРОВОДИМОСТИ

Заметная электропроводность в кристалле германия может возникнуть, если нарушить связи между атомами. Например, свет или тепло могут сообщить некоторым электронам энергию, достаточную для отрыва их от атомов. При этом в кристалле появляются свободные электроны, которые перемещаются беспорядочно, подобно молекулам газа.

Если такой кристалл поместить в электрическое поле, то свободные электроны будут перемещаться в направлении сил поля и в кристалле возникнет электрический ток.

Электропроводность, осуществляемая свободными электронами, называется *электронной проводимостью* полупроводника. Электронная проводимость называется *n-проводимостью* (от французского слова «negative» — отрицательный).

При отрыве электронов от атомов германия в последних образуются свободные места, которые могут быть заняты другими электронами. Такие свободные места получили название дырок. Появление дырки связано с потерей электрона атомом, а потому в области образования ее возникает избыточный положительный заряд. Таким образом, наличие дырки равноценно положительному заряду.

Схема образования и заполнения дырок условно показана на рис. 207. На каждой подставке, установленной наклонно, имеется четыре отверстия (четыре дырки). В них расположено четыре шара

(четыре электрона). Если шар 1 сместится вправо, он освободит отверстие (дырку) и упадет с подставки, тогда в отверстие, которое занимал этот шар, переместится шар 2. Свободное отверстие (дырку) этого шара займет шар 3, а отверстие последнего — шар 4.

Из этой схемы видно, что шары (электроны) перемещаются в одном направлении — вправо, а отверстия (дырки) — в противоположном направлении, т. е. влево. Кроме того, одна дырка заполняется, а в результате этого появляется новая дырка в соседнем атоме.

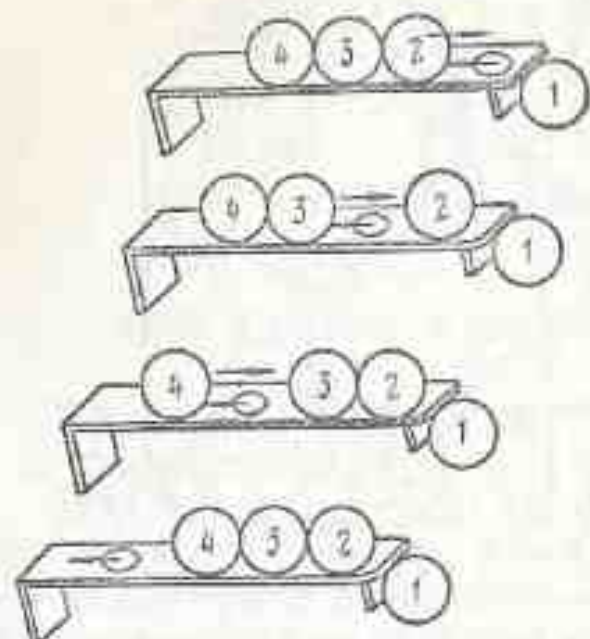


Рис. 207. Схема образования и заполнения дырок в кристалле германия

С перемещением электронов в полупроводнике создается возможность заполнения одних дырок и образования других.

Возникновение каждой новой дырки сопровождается появлением свободного электрона, т. е. непрерывно идет образование пар: электрон — дырка. В свою очередь, заполнение дырок приводит к уменьшению числа свободных электронов.

Таким образом, в кристалле, помещенном в электрическом поле, происходит не только перемещение электронов, имеющих отрицательный электрический заряд, но и перемещение дырок — положительных зарядов. При этом направление перемещения дырок противоположно направлению движения электронов.

Электропроводимость, возникающая в результате перемещения дырок в полупроводнике, называется *дырочной проводимостью*. Дырочная проводимость называется *p-проводимостью* (от слова «positive» — положительный).

§ 151. ПРИМЕСНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКА

Электропроводимость полупроводников германия и кремния резко возрастает, когда к ним добавляют примеси в ничтожно малых, но в строго определенных количествах. К таким примесям, прибавляемым к германию и носящим название донорных, относятся сурьма и мышьяк. Это пятивалентные химические элементы, имеющие по пять электронов на наружной оболочке атома.

Нетрудно понять, что примесные электроны образуют с соседними атомами такие же связи, как и германий, причем используются в этом случае лишь четыре электрона, а пятый (рис. 208, а) оказывается лишним, слабо связанным и может легко быть оторван от своего атома.

Несмотря на то, что количество примеси незначительно, число образующихся при ее наличии слабо связанных электронов в десятки раз превышает их число в чистом германии.

Таким образом, германий, обогащенный пятивалентной примесью, обладает преимущественно носителями электрического заряда в виде свободных (лишних) электронов и поэтому его примесная проводимость будет электронной.

Иную примесную проводимость приобретает германий, если в него вводить атомы трехвалентных элементов. В качестве такой трехвалентной примеси используется индий.

Так как атомы индия имеют три валентных электрона, то при образовании связей с атомами германия одна из четырех возможных связей (рис. 208, б) оказывается неполной, и каждый атом индия присоединяет к себе по четвертому электрону от атомов германия. В результате этого в атомах германия появляются дырки.

Таким образом, германий, обогащенный трехвалентной (акцепторной) примесью, обладает преимущественно носителями положительного электрического заряда в виде дырок, т. е. дырочной проводимостью.

Из сказанного следует, что введением примеси можно во много раз увеличить проводимость полупроводника и придать ей резко выраженный электронный или дырочный характер.

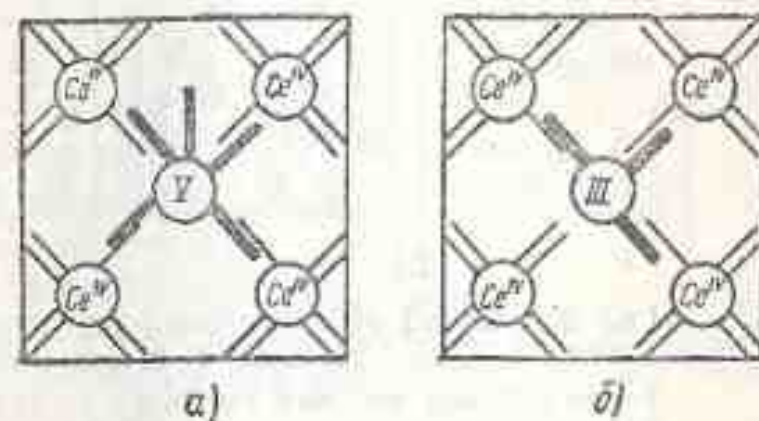


Рис. 208. Схема связи примесей с германием:
а — пятивалентной, б — трехвалентной

§ 152. ОБРАЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНОГО ПЕРЕХОДА

Рассмотрим процесс, который происходит в месте соприкосновения полупроводника, обладающего электронной *n*-проводимостью, с полупроводником, обладающим *p*-проводимостью.

Такая пара полупроводников образует полупроводниковый диод. В нем часть поверхностных электронов из области *n*-проводимости проникает в поверхностный слой *p*-проводимости. Вследствие уменьшения количества электронов на границе контакта в полупроводнике с *n*-проводимостью появится положительный заряд (рис. 209). Поле образовавшегося положительного заряда отталкивает положительные заряды (дырки) полупроводника с *p*-проводимостью, и они перемещаются от границы соприкосновения в глубь полупроводника.

Одновременно с переходом электронов из области n в область p часть положительных зарядов (дырок) по аналогии перейдет из полупроводника с p -проводимостью в полупроводник с n -проводимостью. Вследствие уменьшения количества положительных зарядов на границе контакта в полупроводнике с p -проводимостью появится отрицательный электрический заряд. Поле этого заряда

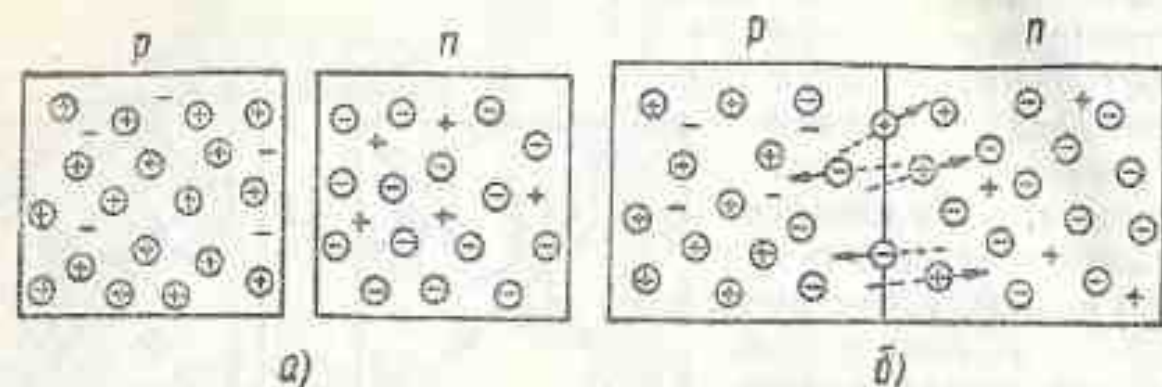


Рис. 209. Схема распределения зарядов в полупроводниках, обладающих p - и n -проводимостью:
 а — до создания плотного контакта, б — при создании плотного контакта

будет отталкивать отрицательные заряды (электроны) полупроводника с n -проводимостью и они переместятся от границы соприкосновения в глубь проводника.

Таким образом, на границе двух полупроводников образуется слой, обедненный носителями зарядов (электронами и дырками), который обладает повышенным сопротивлением. Этот слой принято

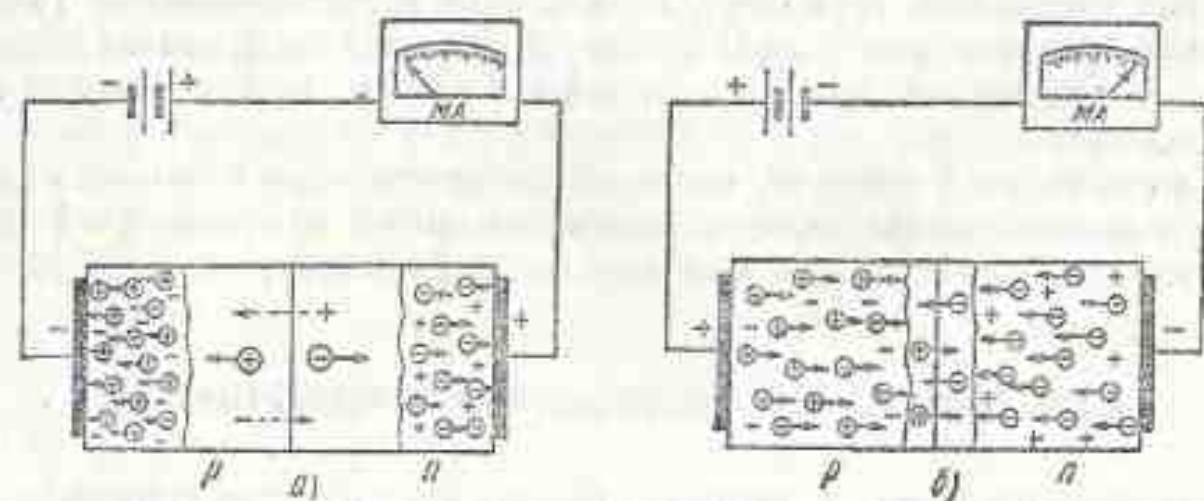


Рис. 210. Принцип работы полупроводникового диода:
 а — через диод ток не протекает, б — через диод ток протекает

называть $p-n$ -переходом или электронно-дырочным переходом. $P-n$ -переход практически составляет доли микрона.

Предположим, что к рассмотренным полупроводникам подключен источник электрической энергии так, что к области p -проводимости присоединен отрицательный полюс источника, а к области n -проводимости — положительный полюс (рис. 210, а). В этом случае под влиянием поля внешнего напряжения электроны и дырки будут в большом количестве соответственно отталкиваться в глубь

полупроводников. $P-n$ -переход увеличится, его сопротивление возрастет и в цепи полупроводникового диода электрического тока практически не будет. Однако незначительному количеству неосновных носителей зарядов (положительных) из n -области и (отрицательных) из p -области, имеющих большие скорости, удастся проскочить $p-n$ -переход и в цепи будет протекать весьма небольшой ток, называемый обратным током.

Изменим полярность источника электрической энергии, подключенного к диоду (рис. 210, б). Теперь электроны n -области и дырки p -области будут взаимно притягиваться и перемещаться к границе этих полупроводников. $P-n$ -переход сужается, его сопротивление резко уменьшается и создаются условия для перехода большого количества электронов из n -области в p -область, а следовательно, для перехода дырок в противоположном направлении. При таком включении полупроводникового диода в цепи появится значительный электрический ток, носящий название прямого тока.

Сила прямого тока в полупроводниках зависит от величины приложенного к ним напряжения.

Из описания процесса, происходящего на границе двух полупроводников с различной по знаку проводимостью, следует, что они обладают, как и электронная лампа — диод, односторонней проводимостью. Это значит, что при одном направлении электрического поля, создаваемого приложенным к полупроводникам прямым напряжением, диод пропускает ток и сопротивление его мало, а при обратном направлении этого поля, создаваемого приложенным к полупроводникам обратным напряжением, сопротивление диода велико, а ток в его цепи весьма мал.

На рис. 211 показана типичная характеристика германиевого диода. Для большей наглядности кривая прямого тока (правая часть графика) и кривая обратного тока (левая часть графика) построены в различных масштабах.

Из графика видно, что при напряжении 1 в на зажимах германиевого диода в его цепи проходит большой ток, зато при напряжении даже минус 10, 20, 30 и 40 в диод практически не пропускает тока.

Это свойство полупроводниковых диодов используется для выпрямления переменного тока в постоянный.

§ 153. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ

В технике применяют кремниевые, селеновые, германиевые и другие полупроводниковые диоды.

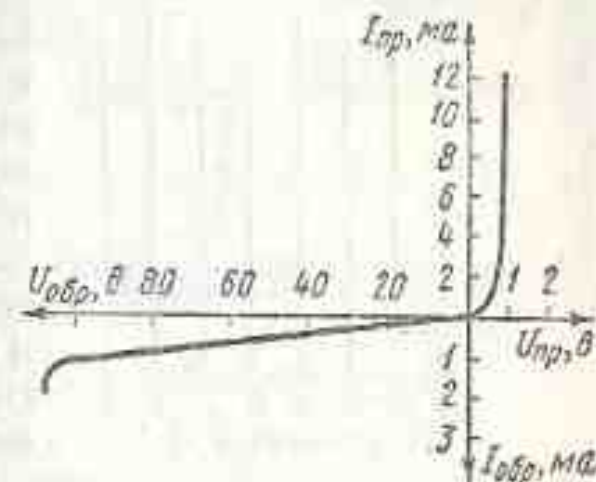


Рис. 211. Характеристика германиевого диода

Селеновый диод представляет собой стальную, алюминиевую или никелированную шайбу, покрытую слоем селена, обладающего дырочной *p*-проводимостью.

Селен, применяемый при производстве диодов, по своим химическим свойствам близок к сере. Он имеет свинцово-серый цвет и кристаллическое строение.

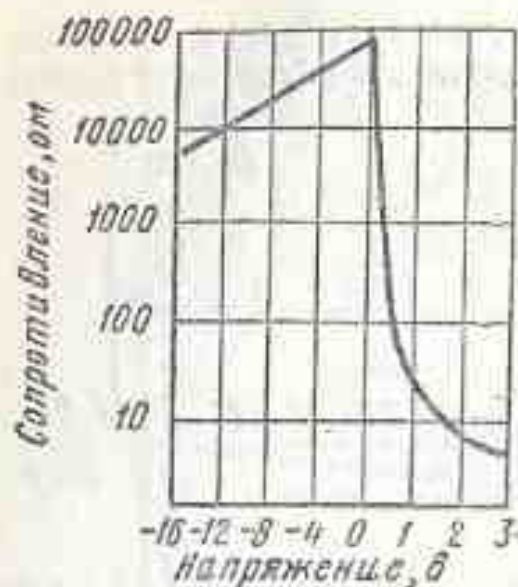


Рис. 212. График зависимости сопротивления селенового диода от приложенного напряжения

На слой селена наносят в расплавленном состоянии сплав олова с кадмием. При этом вследствие проникновения (диффузии) атомов кадмия в селен на поверхности последнего создается слой селенистого кадмия, имеющего электронную *n*-проводимость. Между селеном и селенистым кадмием образуется *p-n*-переход.

Селеновый диод оказывает малое сопротивление току, идущему от селена к сплаву. В обратном направлении, от сплава к селену, диод имеет большое сопротивление.

На рис. 212 приведен график зависимости сопротивления селенового диода от приложенного напряжения при прямом и обратном направлениях тока. При напряжении 3 в прямое сопротивление селенового диода мало, с уменьшением напряжения оно возрастает. При изменении знака приложенного напряжения сопротивление диода достигает наибольшего значения. Предельное обратное напряжение, которое можно подавать на один элемент селенового диода, равно 20 в.

Величина предельно допустимой плотности тока для селеновых диодов составляет 70 *ма* на 1 *см*² рабочей поверхности, т. е. поверхности селенового слоя. Если величина выпрямляемого тока превышает допустимое для одного элемента значение, то шайбы соединяют параллельно, так как при этом возрастает их рабочая поверхность.

Ввиду того что на один выпрямительный элемент (шайбу) допускается подавать напряжение до 20 в, для выпрямления большого напряжения отдельные шайбы соединяют последовательно. Например, при последовательном соединении двух элементов на них можно подать напряжение $U = 20 \cdot 2 = 40$ в, трех элементов — $U = 20 \cdot 3 = 60$ в и т. д. Последовательное соединение шайб в столбик достигается путем плотного соприкосновения тыловой части одной шайбы с рабочей поверхностью следующей шайбы и т. д.

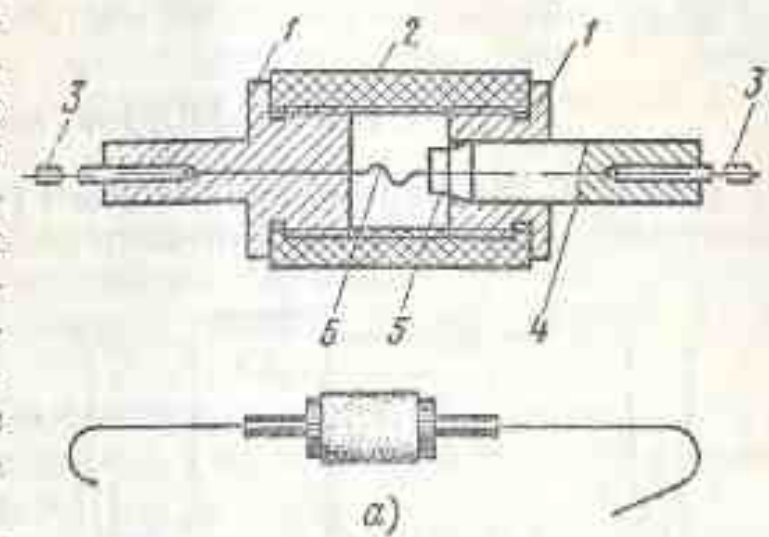
Срок службы селеновых диодов 20—30 тыс. ч. Допустимый нагрев их +70° С.

Полупроводниковые диоды необходимо содержать в чистоте, предупреждать возможность их перегрева. Пропускать по цепи

диода силу тока, большую чем та, на которую он рассчитан, не рекомендуется.

Германиевые диоды изготовляют двух видов: точечные и плоскостные.

Точечный контактный германиевый диод (рис. 213, а) состоит из керамического цилиндра 2, металлических контактодержателей 1, контактной пружины 6, кристаллодержателя 4, кристалла германия 5 и выводных проводников 3. Кристалл имеет электронную проводимость, а под контактным острием в результате специальной обработки создается область с дырочной проводимостью. В настоящее время эти диоды почти вытеснены плоскостными.



На рис. 213, б показана одна из конструкций плоскостного германиевого диода. Два латунных ниппеля с винтовой нарезкой запрессовываются в пластмассу. Перед запрессовкой на один из ниппелей напаяют кристалл, а сквозь отверстие в другом ниппеле пропускают проводник 3, припаянный к электроду, изготовленному из индия. Другой конец проводника запаивают на конце ниппеля.

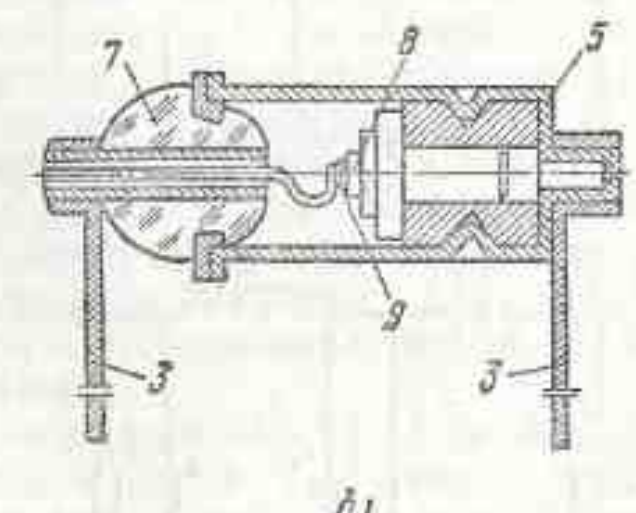


Рис. 213. Германиевые диоды: а — точечный, б — плоскостной: 1 — контактодержатель, 2 — цилиндр, 3 — проводники, 4 — кристаллодержатель, 5 — кристалл, 6 — контактная пружина, 7 — изолятор, 8 — германий, 9 — индий

Германиевые диоды типа Д7Ж, применяемые в выпрямителях, выдерживают обратное напряжение 400 в и пригодны для выпрямления тока 300 *ма*. Диоды типа Д7А выдерживают обратное напряжение 50 в и пропускают выпрямленный ток 300 *ма*.

Германиевые диоды обладают большой механической прочностью и при равной с селеновыми диодами мощности имеют в сотни раз меньшие размеры.

Наша промышленность выпускает кремниевые диоды. Они отличаются от германиевых не только материалом полупроводника, но и некоторыми преимуществами, а именно: более высокой предельной рабочей температурой (для германиевых диодов 70° С, для кремниевых до 150° С); обратный ток в кремниевом диоде при нормальной температуре в тысячу раз меньше, чем в германиевом; более высоким пробивным напряжением (достигает сотни вольт).

Маркировка полупроводниковых диодов состоит из двух элементов: первым является буква Д (диод), вторым — число, указывающее на применяемый материал и конструкцию диода. Так, например, диоды означают: Д1 — Д100 — германиевые точечные, Д101 — Д200 — кремниевые точечные, Д201 — Д300 — германиевые плоскостные, Д301 — Д400 — кремниевые плоскостные.

Выпрямительные столбы имеют обозначение Д1001 и выше.

§ 154. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Для преобразования переменного тока в постоянный применяют полупроводниковые выпрямители.

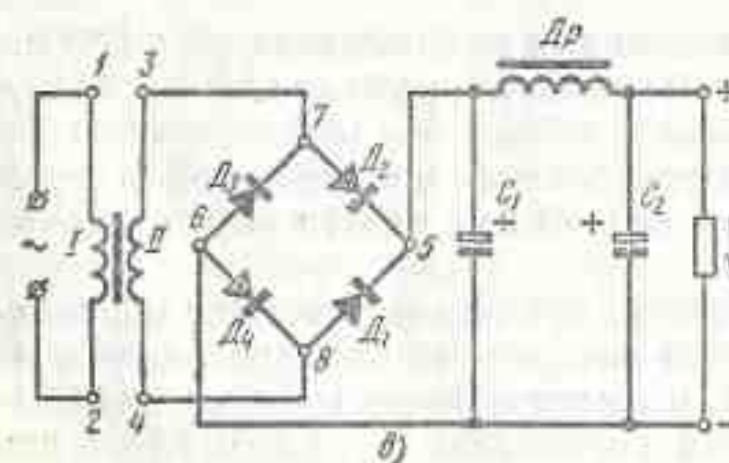
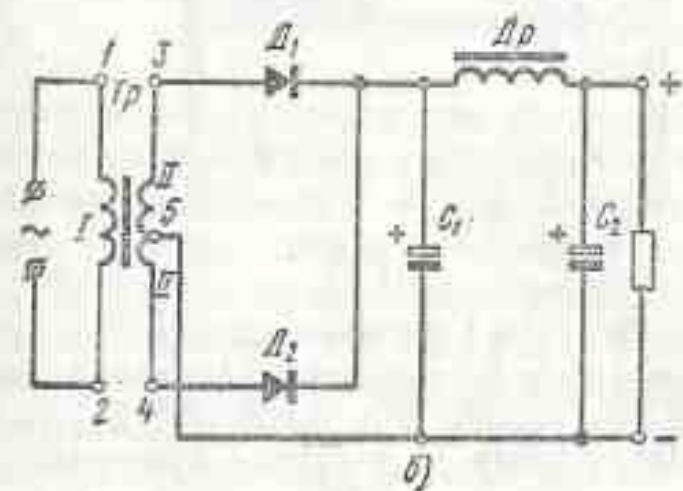
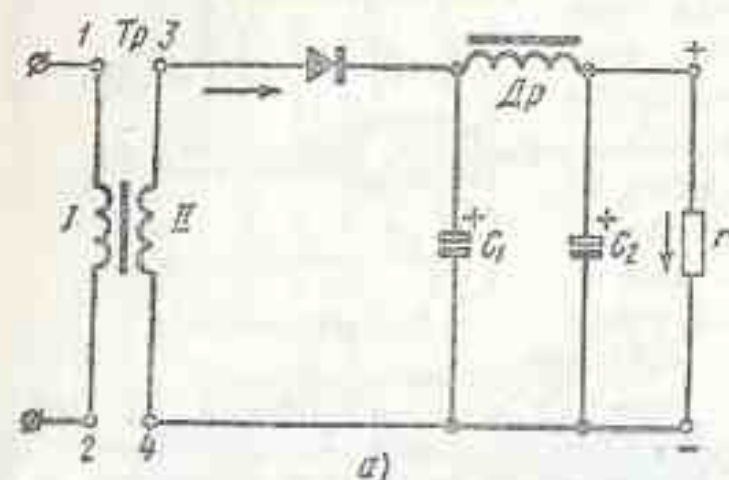


Рис. 214. Схема выпрямления:
а — однополупериодного, б — двухполупериодного со средней точкой, в — мостовая

На рис. 214, а приведена принципиальная схема однополупериодного выпрямления с применением полупроводникового диода. К первичной обмотке трансформатора Tp подключен источник переменного тока. Последовательно со вторичной обмоткой включены полупроводниковый диод и приемник постоянного тока r . Через первичную обмотку в течение одного полупериода протекает переменный ток в направлении от точки 1 к точке 2, в течение второго полупериода — в обратном направлении, т. е. от точки 2 к точке 1. Когда в точке 3 вторичной обмотки будет положительный потенциал относительно точки 4, через диод и приемник r будет протекать ток в направлении, показанном на схеме стрелкой (от «+» к «-»). В следующий полупериод, когда в точке 3 вторичной обмотки будет отрицательный потенциал относительно точки 4, ток через приемник протекать не будет (поскольку диод обладает односторонней проводимостью). В следующие полупериоды процесс повторится.

Схема двухполупериодного выпрямления показана на рис. 214, б. К первичной обмотке трансформатора Tp подключен источник переменного тока. В цепь вторичной обмотки включены два полупроводниковых диода. К средней точке этой обмотки присоединена нагрузка.

Допустим, что в точке 3 вторичной обмотки в первый полупериод будет положительный потенциал относительно точки 5, а в точке 4 — отрицательный. Тогда ток пройдет через диод D_1 , дроссель Dp и приемник в точку 5 трансформатора. В это время диод D_2 тока не пропускает.

В течение второго полупериода потенциал на концах вторичной обмотки трансформатора изменится, в точке 3 будет отрицательный потенциал, а в точке 4 — положительный. Ток пройдет через диод D_2 , дроссель Dp и приемник в точку 5. В это время диод D_1 тока пропускать не будет.

В следующие полупериоды процесс повторится. Таким образом, через приемник будет проходить ток в одном и том же направлении в течение каждого полупериода.

Двухполупериодное выпрямление часто осуществляется также по мостовой схеме, приведенной на рис. 214, в. В этой схеме общее напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора равно половине общего напряжения на зажимах вторичных обмоток (двух половин) обычной двухполупериодной схемы. В связи с этим на изготовление трансформатора для мостовой схемы затрачивается меньше материалов и он получается более легким и дешевым. Первичная обмотка I трансформатора Tp включена в сеть переменного тока. В цепь вторичной обмотки II включены четыре диода, а к точкам 5 и 6 присоединен приемник.

Допустим, что в точке 3 вторичной обмотки в первый полупериод потенциал положительный, а в точке 4 — отрицательный. Тогда электрический ток пройдет от точки 3 через точку 7, диод D_2 , точку 5, приемник (в направлении, указанном стрелкой), точку 6 и диод D_4 , через точку 8 к точке 4 вторичной обмотки.

В течение второго полупериода полярность в точках 3 и 4 вторичной обмотки изменится: в точке 3 будет отрицательный потенциал, а в точке 4 — положительный. Тогда ток пройдет от точки 4 через точку 8, диод D_1 , точку 5, приемник (в том же направлении), точку 6, диод D_3 и через точку 7 к точке 3.

В каждый полупериод через приемник будет протекать ток в одном и том же направлении.

Мостовая схема выпрямления может быть собрана и без трансформатора.

При изготовлении выпрямителя на полупроводниковых диодах необходимо иметь в виду, что полупроводниковый диод может отдать номинальную силу выпрямленного тока только при использовании его в схеме однополупериодного выпрямления без сглаживающего фильтра, работающего на активную нагрузку.

При использовании диода в выпрямителе с фильтром, имеющем на входе конденсатор, нормальный режим работы диода обеспечи-

вается при условии снижения выпрямленного тока в 2—2,5 раза по сравнению с номинальным. Это связано с тем, что диод длительное время нагружен током.

§ 155. ТРАНЗИСТОРЫ

Транзисторы служат для тех же целей, что и ламповые триоды, т. е. для усиления и генерирования колебаний, но они по сравнению с электронными лампами обладают рядом преимуществ: очень большим сроком службы, малыми размерами, большой механической прочностью, отсутствием расхода энергии на накал, незначительным собственным потреблением энергии.

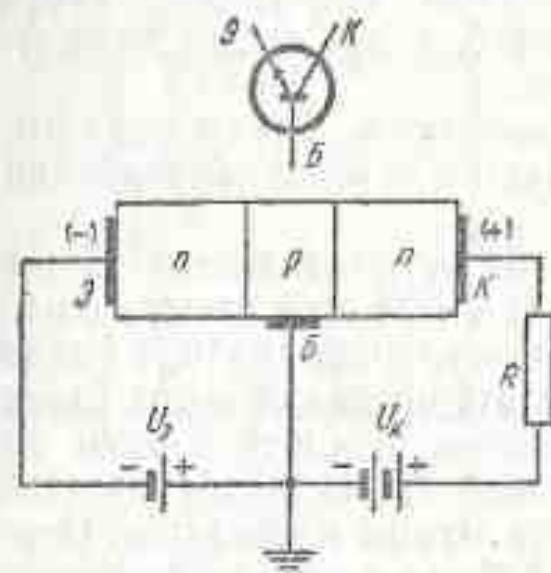


Рис. 215. Схема работы транзистора *n-p-n*

Транзистор представляет собой пластинку из кремния или германия, состоящую из трех областей. Две крайние области всегда обладают одинаковым типом проводимости, а средняя — противоположной проводимостью.

Транзисторы, у которых средняя область имеет электронную проводимость, сокращенно называются транзисторами типа *p-n-p*; транзисторы, у которых средняя область обладает дырочной проводимостью, — транзисторами типа *n-p-n*.

Физические процессы, происходящие в транзисторах двух типов, аналогичны.

Рассмотрим работу плоскостного кремниевого транзистора типа *n-p-n*. Такой транзистор (рис. 215) содержит два электронно-дырочных перехода, отделяющих две крайние области с электронной проводимостью от средней области с дырочной проводимостью.

В условиях работы транзистора к левому слою прикладывается прямое постоянное напряжение, а к правому — обратное. Под действием электрического поля большая часть электронов из левой *n*-области, преодолевая *p-n*-переход, переходит в очень узкую среднюю *p*-область. Здесь большая часть электронов продолжает движение по направлению ко второму переходу. Приближаясь к нему, электроны попадают в электрическое поле, созданное внешним положительным напряжением батарей U_k . Под влиянием этого поля электроны быстро вытягиваются в правую *n*-область, что вызывает увеличение тока в цепи этой батарей, так как сильно снижается сопротивление второго перехода.

При увеличении напряжения батарей $U_э$ число электронов, двигающихся из левой области в среднюю, будет расти и, следовательно, число электронов, переходящих из средней области в правую, также будет увеличиваться.

Каждая из трех областей транзистора имеет свое название: левая область, испускающая (эмиттирующая) электроны — носители зарядов, называется эмиттером Э; правая область, собирающая носители зарядов, — коллектором К, а средняя область — основанием или базой Б. В известной мере можно считать, что эмиттер по своему назначению подобен катоду, коллектор — аноду, а база — управляющей сетке трехэлектродной лампы.

Если в цепь эмиттера включить переменное напряжение $U_э$ (рис. 216), то оно будет складываться с напряжением батарей $U_э$ и изменять ток эмиттера. В результате этого через левый эмиттерный переход будет протекать не постоянный, а пульсирующий электрический ток.

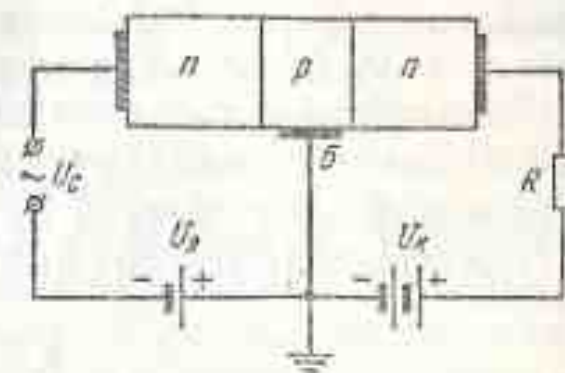


Рис. 216. Схема включения транзистора *n-p-n* с источником переменного тока

Изменение силы тока в цепи эмиттера $I_э$ вызовет изменение тока в цепи коллектора I_k . Однако поскольку не все электроны, испускаемые эмиттером, достигают коллектора, а небольшая часть из них рекомбинирует, т. е. заполняет некоторое количество дырок в средней области триода (базе), изменение силы тока в цепи коллектора I_k будет несколько меньше, чем в цепи эмиттера.

Практически сила тока коллектора составляет 98—99% тока эмиттера.

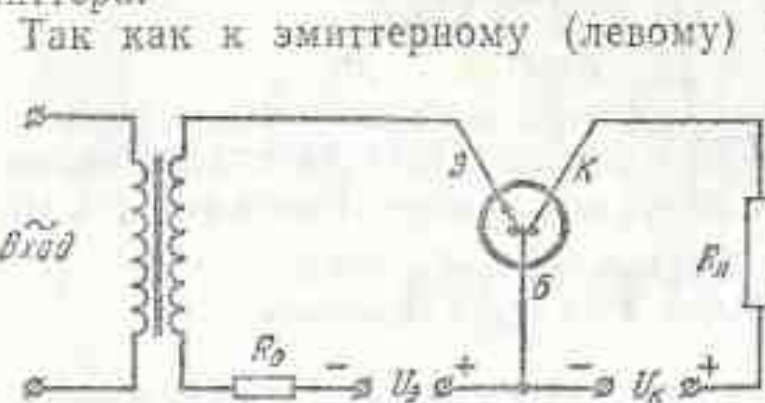


Рис. 217. Простейшая схема усилителя с транзистором

Так как к эмиттерному (левому) *n-p*-переходу приложено напряжение в прямом направлении, этот переход обладает малым сопротивлением. Правый же коллекторный *p-n*-переход, на который напряжение подано в обратном направлении, имеет большое сопротивление. По этой причине напряжение, прикладываемое к эмиттеру, обычно весьма невелико, а напряжение, подаваемое

на коллектор, может быть достаточно большим.

Изменение силы тока в цепи, создаваемого малым напряжением $U_э$, вызывает почти такое же изменение силы тока в цепи коллектора, где действует значительно большее напряжение U_k . В результате этого в транзисторе осуществляется усиление мощности.

Простейшая схема усилителя с транзистором изображена на рис. 217.

На вход трансформатора подается усиливаемый сигнал. В цепь эмиттера включена вторичная обмотка трансформатора, а для огра-

ничения силы тока введено сопротивление. В цепь коллектора (на выходе триода) включена нагрузка R_n .

Батарея U_b подсоединяется в прямом направлении и поэтому эмиттерный $n-p$ -переход обладает малым сопротивлением. Батарея U_k подсоединяется в обратном направлении, в связи с чем сопротивление коллекторного $n-p$ -перехода имеет значительную величину.

Сопротивление нагрузки R_n при соответствующем подборе напряжения батареи U_k может быть достаточно большим по сравнению с сопротивлением на входе усилителя.

Транзистор будет усиливать мощность подаваемого сигнала, так как мощность, подводимая к его входу ($P_{вх} = I_1^2 R_{вх}$), меньше полезной мощности сигнала на выходе, т. е. в нагрузке ($P_n = I_2^2 R_n$).

Коэффициент усиления по мощности

$$K = \frac{P_n}{P_{вх}} = \frac{I_2^2 R_n}{I_1^2 R_{вх}} \quad (161)$$

Ввиду того что база рассмотренного транзистора является общей для цепи эмиттера и коллектора, такая схема включения называется *схемой с общей базой*.

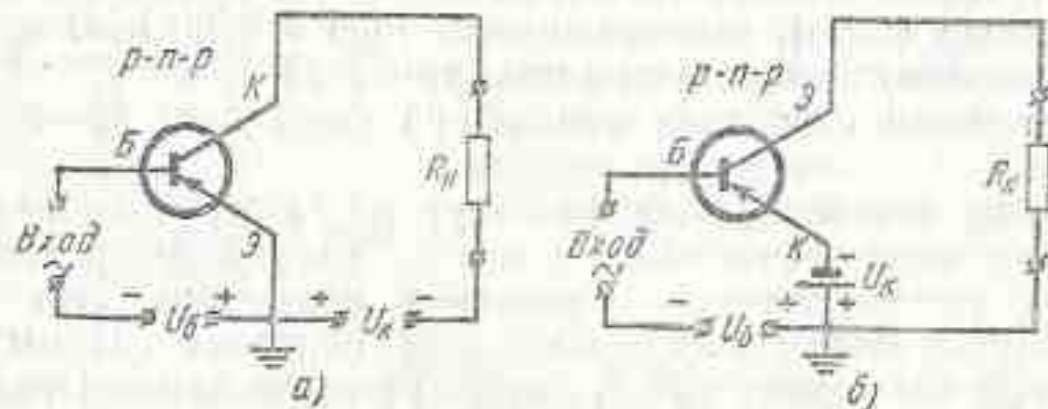


Рис. 218. Схемы включения транзисторов:
а — с общим эмиттером, б — с общим коллектором

При применении этой схемы выходной ток — ток коллектора практически равен току эмиттера — входному току, поэтому при включении триода по схеме с общей базой нет усиления по току, а происходит усиление мощности и напряжения.

Отличительные особенности транзистора типа $p-n-p$ по сравнению с транзисторами типа $n-p-n$ заключаются в обратной полярности включения источников питания, а также в том, что электрический ток в этих транзисторах создается в основном не электронами, а дырками.

Кроме этой схемы, применяют еще две схемы включения транзисторов: схема с общим (заземленным) эмиттером и схема с общим коллектором. В схеме с общим эмиттером (рис. 218, а) усиленный сигнал подается к зажимам «Вход» между базой и эмиттером, а усиленное напряжение снимается с сопротивления нагрузки

R_n . В этой схеме эмиттер является общим электродом для входной и выходной цепи транзистора.

Батарея U_b обеспечивает подачу постоянного напряжения на базу, а батарея U_k — подачу напряжения на коллектор транзистора. Особенностью этой схемы включения транзистора является ее способность обеспечить усиление по току и высокое усиление по мощности (достигает 10 000 раз), что и определяет ее широкое применение.

В схеме с общим коллектором (рис. 218, б) усиливаемый сигнал подается на зажимы «Вход» между базой и заземлением, а усиленное напряжение снимается с сопротивления нагрузки R_n , подключенного к зажимам «Выход» — между эмиттером и заземлением. В этой схеме коллектор является общим электродом для входной и выходной цепи транзистора. Схема с заземленным коллектором используется в основном в первом входном усилительном каскаде. Это связано с тем, что схема имеет высокое входное сопротивление и не может обеспечить усиления напряжения сигнала больше единицы.

Важными параметрами транзисторов являются коэффициенты усиления по току, напряжению и мощности. Коэффициент усиления по току для схемы с общей базой обозначается буквой α , а для схемы с общим эмиттером — буквой β .

Коэффициент усиления по току α определяется отношением изменения силы тока в цепи коллектора ΔI_k к изменению тока в цепи эмиттера ΔI_e при неизменном напряжении коллектор — база:

$$\alpha = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_e} \text{ при } U_{k-b} = \text{const.} \quad (162)$$

Коэффициент усиления по току β определяется отношением изменения силы тока в цепи коллектора ΔI_k к изменению тока в цепи базы ΔI_b при неизменном напряжении коллектор — эмиттер:

$$\beta = \frac{\Delta I_k}{\Delta I_b} \text{ при } U_{k-e} = \text{const.} \quad (163)$$

Коэффициент усиления по напряжению определяется по формуле

$$K_U = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_1} \text{ или } K_U = \frac{I_2 R_n}{I_1 R_{вх}} \quad (164)$$

где ΔU_2 — изменение напряжения на выходе, в,

ΔU_1 — изменение напряжения на входе, в,

I_2 — сила тока в цепи выхода, а,

I_1 — сила тока в цепи входа, а,

R_n — сопротивление нагрузки, ом,

$R_{вх}$ — входное сопротивление, ом.

Коэффициент усиления триода по мощности равен отношению выходной мощности P_2 к мощности P_1 , подаваемой на его вход:

$$K_P = \frac{P_2}{P_1} \quad (165)$$

Этот коэффициент можно определить произведением коэффициентов усиления по току на коэффициент усиления по напряжению:

$$K_p = K_i K_U. \quad (166)$$

На рис. 219 показана принципиальная схема многокаскадного усилителя низкой частоты с применением транзисторов. При входном напряжении 150 мВ мощность на выходе усилителя достигает 1 Вт при нагрузке 5 Ом. Мощность, потребляемая от источника электрической энергии, примерно 4,5 Вт.

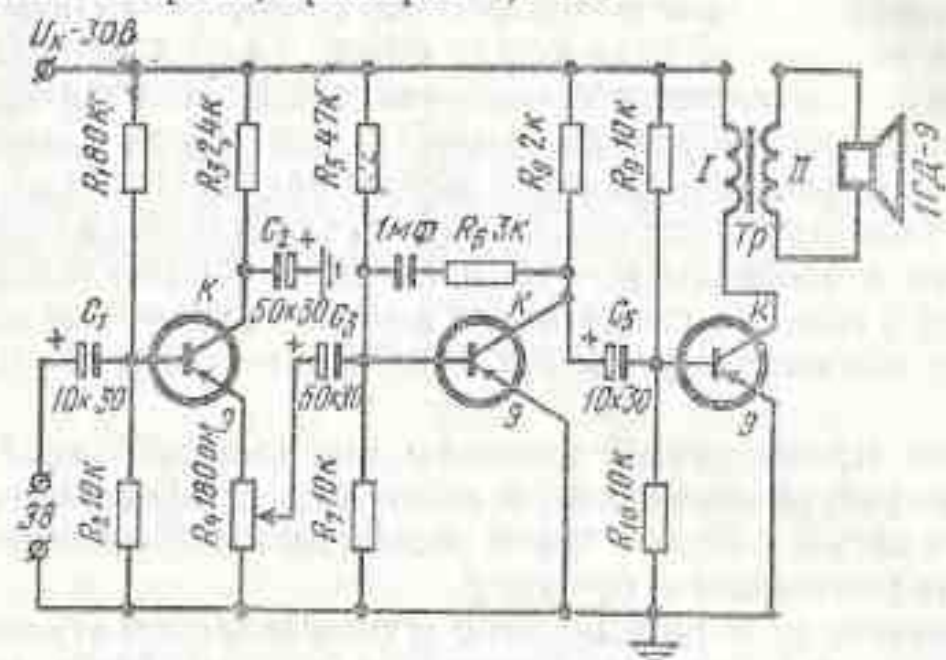


Рис. 219. Схема трехкаскадного усилителя на полупроводниковых триодах.

На входе усилителя применен каскад на транзисторе с заземленным по низкой частоте коллектором. Выходное напряжение с этого каскада снимается с переменного сопротивления нагрузки R_4 , включенного в цепь эмиттера. С помощью этого сопротивления, включенного как потенциометр, осуществляется регулировка усиления. Сопротивление R_3 , включенное в цепь коллектора транзистора первого каскада, обеспечивает получение необходимого напряжения на коллекторе транзистора.

Второй каскад усилителя работает на транзисторе П202, включенном по схеме с заземленным эмиттером. Эта схема характеризуется высоким коэффициентом усиления по напряжению. Сопротивление R_8 — сопротивление нагрузки каскада.

Выходной каскад усилителя работает на транзисторе, включенном по схеме с заземленным эмиттером. Каскад нагружен на трансформатор Tr , во вторичную обмотку которого подключается звуковая катушка громкоговорителя типа 1ГД-9 сопротивлением 5—6 Ом. В усилителе использованы сопротивления МЛТ и ВС мощностью 0,25 Вт, малогабаритные переменные сопротивления и малогабаритные конденсаторы.

§ 156. ТИРИСТОРЫ

Наряду с полупроводниковыми диодами и транзисторами в технике все шире используют управляемые полупроводниковые

приборы с четырехслойной $p-n-p-n$ структурой, называемые тиристорами.

По внутренней структуре тиристоры отличаются от транзисторов тем, что вместо трех в них имеются четыре полупроводниковых слоя с тремя электронно-дырочными переходами (рис. 220). К p -области анода A прилегает относительно широкая область базы с электронной проводимостью, за ней — тонкая базовая область с дырочной проводимостью, к которой присоединен вывод управляющего электрода УЭ, и область катода K с электронной проводимостью. Слои наращиваются обычно на тонкой кремниевой пластинке методом диффузии и сплавления.

При приложении к тиристорному прямому напряжению E переходы Π_1 и Π_3 окажутся открытыми (проводящими), а на переходе Π_2 будет обратное смещение. Поэтому действие тиристора можно заменить эквивалентным действием комбинации из двух транзисторов: транзистора типа $p-n-p$ с эмиттерным переходом Π_1 и коллекторным Π_2 и транзистора типа $n-p-n$, имеющего тот же коллекторный переход Π_2 и эмиттерный — Π_3 . Соединение обоих транзисторов показано на рис. 221.

Из эквивалентной схемы видно, что ток коллектора транзистора типа $p-n-p$ одновременно является током базы, отпирающим транзистор $n-p-n$, а коллекторный ток последнего — базовым током, отпирающим транзистор типа $p-n-p$. При увеличении прямого напряжения батареи E , подаваемого на тиристор, небольшое приращение тока в цепи эмиттера транзистора типа $p-n-p$ $\Delta I_{\text{э}1}$, вызовет приращение тока в цепи коллектора этого же транзистора $\Delta I_{\text{к}1}$, что, в свою очередь, приводит к увеличению коллекторного тока сопряженного транзистора $\Delta I_{\text{к}2}$, а также коллекторного транзистора типа $p-n-p$ $\Delta I_{\text{к}1}$. Далее процесс продолжается, и ток эквивалентных транзисторов возрастает.

Наличие третьего вывода УЭ тиристора значительно облегчает управляемость прибора. Увеличение тока в цепи тиристора может быть достигнуто независимо от величины приложенного напряжения путем введения дополнительного тока через управляющий электрод в одну из базовых областей структуры. Ток в цепи управляющего электрода, складываясь с общим

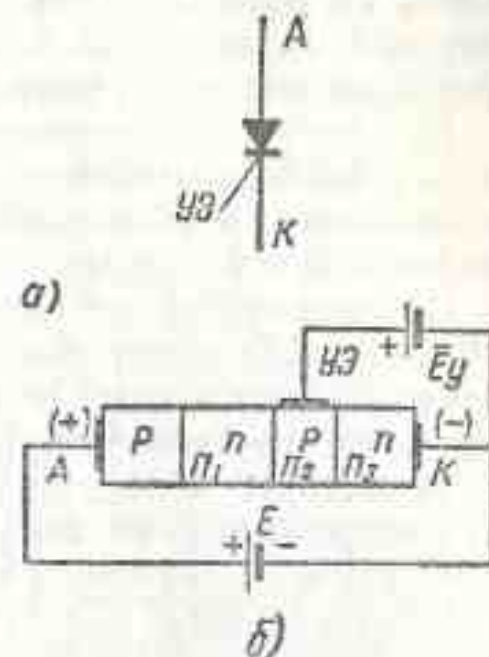


Рис. 220. Тиристор: а — условное обозначение, б — схема включения

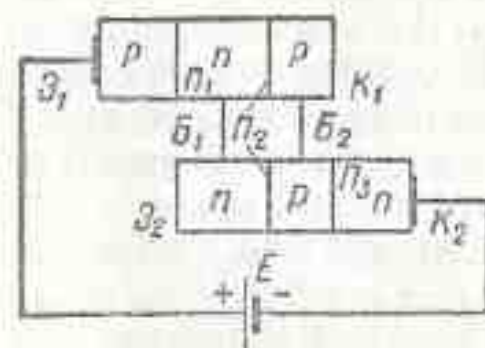


Рис. 221. Эквивалентная схема тиристора

током прибора, вызовет увеличение коэффициента усиления по току транзистора *p-n-p* типа, в результате чего начнется лавинное нарастание тока в цепи.

После отпирания тиристора за счет тока в цепи управляющего электрода управляющее действие его прекращается. Запирание тиристора может быть осуществлено путем изменения полярности напряжения на аноде или уменьшения тока, протекающего через прибор до значения, называемого током «удержания».

Из сказанного следует, что работа управляемого полупроводникового прибора подобна работе тиратрона, в котором управление включением анодной цепи выполняется подачей напряжения зажигания на сетку лампы.

По сравнению с тиратроном тиристоры имеют меньший вес и габариты, обладают большой механической прочностью и значительно большим коэффициентом полезного действия. Тиристор может работать при более низких напряжениях питания.

Тиристоры обладают рядом преимуществ и перед мощными транзисторами. Они могут работать при очень больших токах и более высоких обратных напряжениях.

Существенным недостатком тиристоров является то, что они не могут быть выключены с помощью управляющего сигнала.

В настоящее время тиристоры применяют в основном в устройствах электропитания в качестве выпрямителей, преобразователей энергии, частотных преобразователей, в устройствах защиты электронной аппаратуры.

§ 157. ФОТОЭЛЕМЕНТЫ И ФОТОРЕЛЕ

Фотоэлементом называется прибор, в котором воздействие лучистой энергии оптического диапазона вызывает изменение его электрических свойств.

Фотоэлементы разделяются на три типа: 1) с внешним фотоэффектом, 2) с внутренним фотоэффектом, 3) с запирающим слоем.

В фотоэлементе с внешним фотоэффектом действие света вызывает выход из поверхностного слоя фотокатода электронов во внешнее пространство — в вакуум или сильно разреженный газ.

Схема устройства такого фотоэлемента приведена на рис. 222, а. На внутреннюю стенку стеклянной колбы 1, из которой откачан воздух, с одной стороны нанесен фотокатод 2. Широкое применение получили сурьмяно-цезиевые фотокатоды. В центре колбы вакуумного фотоэлемента укреплен металлический анод 3 в виде небольшого кольца или пластинки. Колба снабжена пластмассовым цоколем 4. В нижней части цоколя находятся контактные штырьки 5, к которым подводятся соединительные провода от фотокатода и анода. При помощи этих штырьков фотоэлемент вставляется в фотоэлементную панель.

Для работы фотоэлемента к его аноду и катоду подключают источник электрической энергии — батарею.

Анод соединяется с положительным зажимом, а фотокатод — с отрицательным зажимом источника электрической энергии.

Под действием подведенного к электродам фотоэлемента напряжения внутри него образуется электрическое поле, и электроны, вылетающие с поверхности освещенного фотокатода, направляются на положительно заряженный анод. Эти электроны создают в цепи анода электрический ток, который можно измерить гальванометром.

В паспорте фотоэлемента указывается его чувствительность, которая определяется

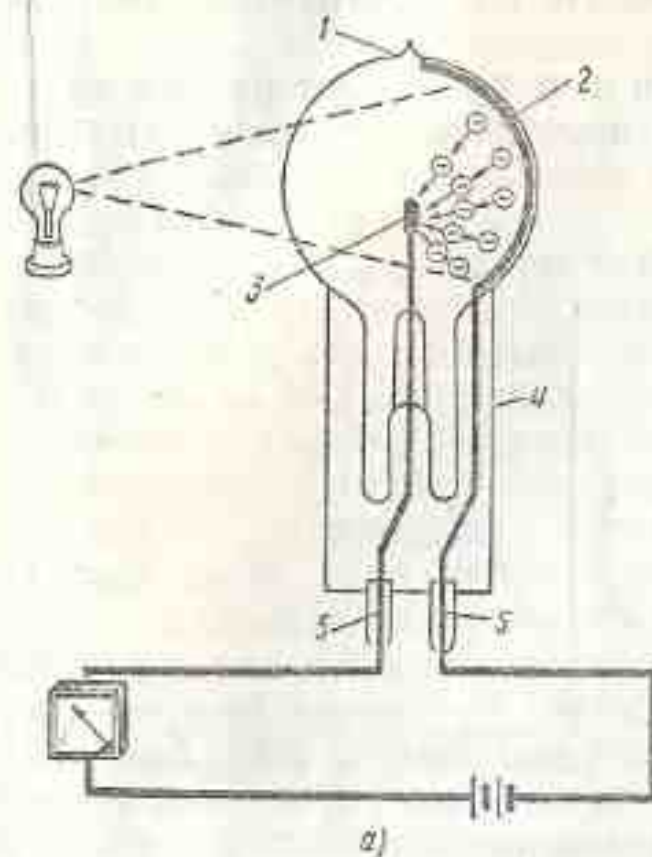
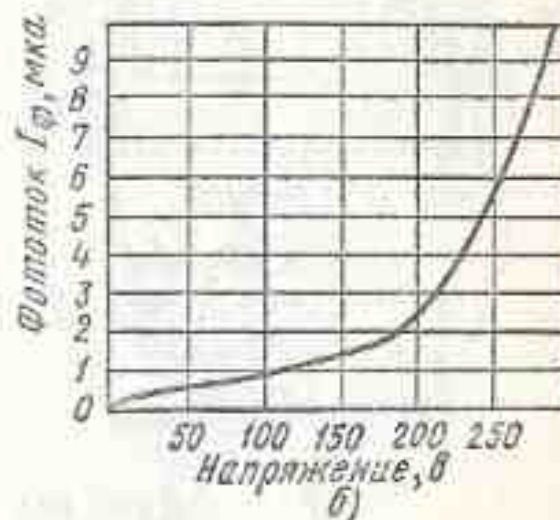


Рис. 222. Фотоэлемент с внешним фотоэффектом:
а — схема включения, б — характеристика



отношением величины фототока (в *мкА* или *мА*), получаемого в цепи, на единицу светового потока (люмен), падающего на фотокатод.

Для увеличения чувствительности фотоэлементов внутрь колбы иногда вводят небольшое количество газа, чаще всего аргона. Такие фотоэлементы называются *газонаполненными*. Величина чувствительности фотоэлемента различных типов колеблется от 20 до 150 *мкА/лм*.

Для практического использования фотоэлементов важное значение имеет его вольт-амперная характеристика (рис. 222, б). Она выражает зависимость фототока от величины приложенного напряжения к зажимам фотоэлемента при неизменной величине светового потока, освещающего фотокатод.

Внутреннее сопротивление вакуумных фотоэлементов исчисляется сотнями мегом, а газонаполненных — несколькими десятками мегом. Схема устройства фотоэлементов с внутренним фотоэффектом, носящих название фотосопротивлений (*ФС*) или фоторезисторов, приведена на рис. 223, а.

Фотосопротивление представляет собой стеклянную пластинку, покрытую тонким слоем полупроводникового материала (сернисто-

го свинца, сернистого висмута, сернистого кадмия), на котором расположены токопроводящие электроды.

Сущность внутреннего фотоэффекта сводится к следующему. Известно, что электропроводимость связана с количеством носителей заряда, который имеет тот или иной материал. В полупроводниках количество носителей электрических зарядов может увеличиваться вследствие поглощения энергии извне, в частности под воздействием световой энергии.

Увеличение количества носителей электрических зарядов в материале повышает его способность проводить электрический ток.

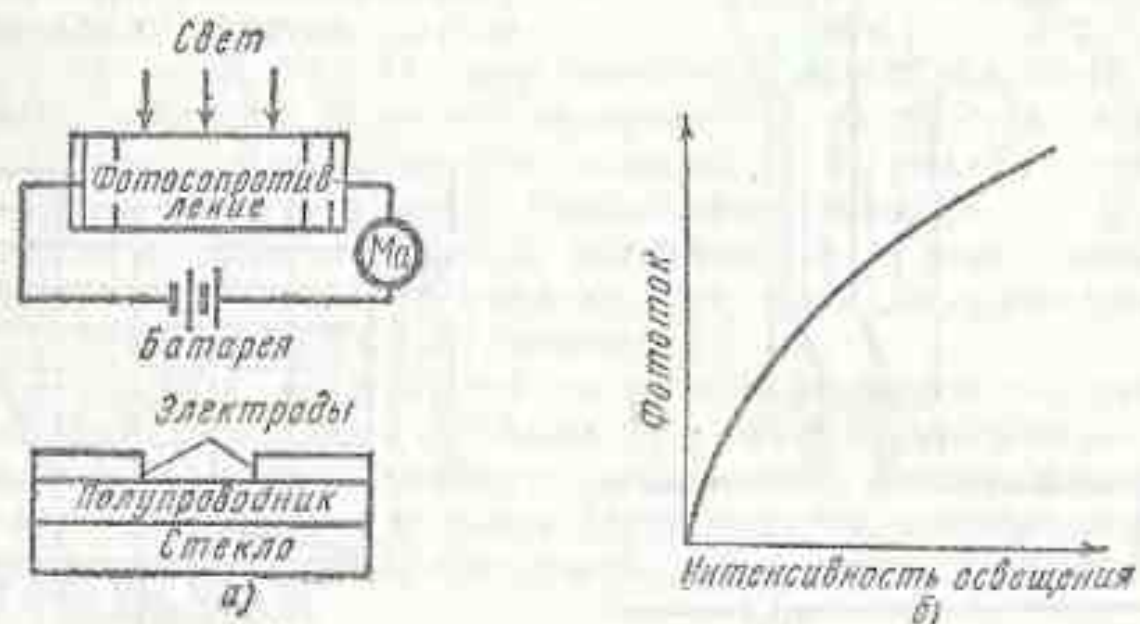


Рис. 223. Фотосопротивление:
а — устройство, б — световая характеристика

В результате этого уменьшается электрическое сопротивление освещаемого материала.

Отличительная особенность фотосопротивлений от фотоэлементов с внешним фотоэффектом заключается в том, что при внешнем фотоэффекте электроны покидают пределы освещенного материала, а при внутреннем фотоэффекте они остаются внутри материала, увеличивая тем самым количество носителей электрических зарядов.

Изменение проводимости в полупроводниках под воздействием света может быть очень большим. В некоторых материалах при переходе от темноты к интенсивному освещению сопротивление уменьшается в десятки раз и соответственно изменяется величина тока в цепи фотосопротивлений (рис. 223, б).

Величина изменения сопротивления, вызванная воздействием светового потока на фотосопротивление,

$$\Delta r = r_t - r_c \quad (167)$$

где Δr — изменение сопротивления ФС, ом,

r_t — сопротивление ФС в темноте, ом,

r_c — сопротивление ФС при его освещении, ом.

Число, показывающее, во сколько раз r_t больше r_c , называется кратностью изменения сопротивления ФС.

$$r_{кр} = \frac{r_t}{r_c} \quad (168)$$

Оно может иметь значение от 1,0 до 500. Чувствительность их оценивается в мка при напряжении 1 в и составляет 500—3000 мка/лм·в, следовательно, превышает чувствительность фотоэлементов с внешним фотоэффектом. Поэтому в ряде устройств в настоящее время фотосопротивлениями заменены фотоэлементы с внешним фотоэффектом.

Недостатком фотосопротивлений является то, что при их освещении фототок не сразу достигает своего конечного значения, а лишь через некоторое время (инерционность фотоэлемента), то же относится к нелинейной зависимости фототока от силы света, т. е. фототок возрастает медленнее, чем сила света, освещающая фотоэлемент. Кроме того, фототок зависит от температуры среды (1—3% на 10°С). Последнее обстоятельство затрудняет применение фотосопротивлений при больших изменениях температуры внешней среды.

Устройство одного из фотоэлементов с фотоэффектом в запирающем слое, носящих название вентильных фотоэлементов, показано на рис. 224. На стальное основание нанесен слой селена, на котором помещается тончайшая (тысячные доли микрона) полупрозрачная пленка из золота. Между полупроводником и металлом при обработке фотоэлемента образуется электронно-дырочный $p-n$ -переход.

Корпус фотоэлемента, изготовленный из изоляционного материала, имеет два зажима.

Когда на светочувствительную поверхность фотоэлемента падают лучи света, они, проникая сквозь полупрозрачную пленку металла в полупроводник — селен, освобождают в нем электроны; последние проникают через $p-n$ -переход в металлическую пленку и заряжают ее отрицательным зарядом. При этом опорный электрод вследствие ухода электронов заряжается положительно. Под действием возникшей разности потенциалов в цепи элемента возникает фототок.

Селеновые фотоэлементы обладают высокой чувствительностью (до 500—600 мка/лм).

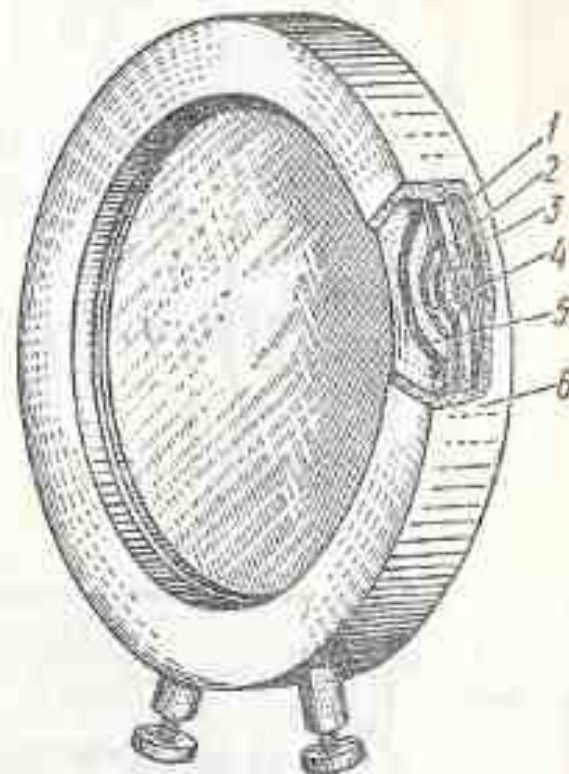
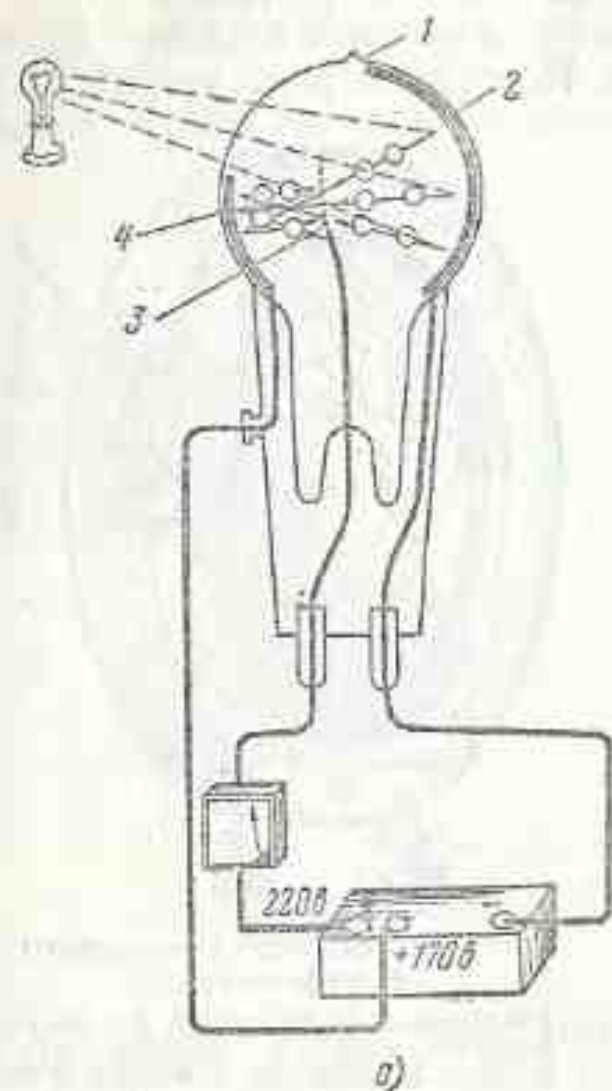


Рис. 224. Устройство селенового фотоэлемента:

1 — основание, 2 — селен, 3 — запирающий слой, 4 — металлическая пленка, 5 — контактное кольцо, 6 — корпус

Кроме селена, для изготовления вентильных фотоэлементов применяют сернистый галлий, закись меди, сернистое серебро, германий и кремний. Важным отличием таких фотоэлементов является возможность получения значительного фототока при освещении их поверхности без включения в цепь источника электрической энергии.



Наряду с фотоэлементами существуют фотоэлектронные приборы с внутренним усилением фототока, носящие название фотоумножителей. Схема одной из конструкций фотоумножителя изображена на рис. 225, а.

Однокаскадный фотоумножитель, как и фотоэлемент, представляет собой стеклянную колбу, на внутренние стенки которой с одной стороны нанесен фотокатод, а с другой — эмиттер вторичных электронов. Анод в виде сетки расположен вблизи от эмиттера.

К электродам фотоумножителя подводится напряжение от источника электрической энергии.

Рабочее напряжение для фотоумножителя выбирают так, чтобы анод имел относительно фотокатода положительный потенциал, равный, например, 220 в, а эмиттер — меньший потенциал, например, 170 в.

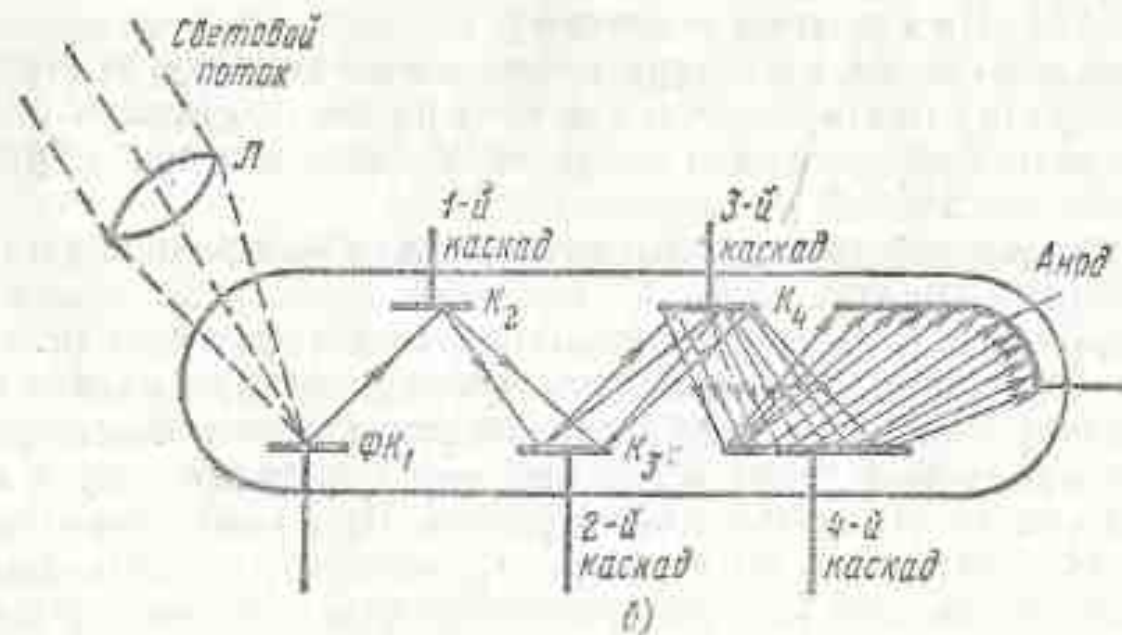


Рис. 225. Фотоумножитель:

а — однокаскадный, б — многокаскадный; 1 — колба, 2 — фотокатод, 3 — анод, 4 — эмиттер

При освещении фотокатода вылетающие с его поверхности первичные электроны под действием электрического поля, создаваемого между анодом и фотокатодом, с большой скоростью устремляются к положительно заряженному аноду. Так как анод выполнен в виде сетки, то большинство электронов пролетает сквозь нее и с силой ударяется о поверхность эмиттера. Каждый электрон, попадающий на эмиттер, выбивает несколько электронов с его поверхности. В результате такой бомбардировки эмиттера с его поверхности вылетает множество вторичных электронов, число которых в 7—10 раз превышает количество первичных электронов, ударяющихся об эмиттер.

Вследствие того, что анод имеет относительно эмиттера потенциал $U=50$ в и близко расположен к нему, все электроны попадают на анод и в его цепи возникает анодный ток, превышающий в 7—10 раз фототок, образованный первичными электронами, вылетающими из фотокатода. Образованный поток вторичных электронов можно, воздействуя на него электрическим или магнитным полем, направить последовательно на несколько (до 20) эмиттеров. В этом случае получится еще более значительный, многократно усиленный поток электронов (усиление до 10^8). Такой способ усиления фототока называют *умножением*. По этой причине приборы, в основе действия которых лежит этот процесс, называются *фотоумножителями*.

На рис. 225, б показана схема четырехкаскадного фотоумножителя. Световые лучи через линзу L фокусируются на фотокатод ФК₁.

Поток первичных электронов с этого катода попадает на катод K_2 (первый каскад усиления), излучающий увеличенный поток вторичных электронов. Этот поток электронов последовательно усиливается на каскадах с катодами K_3 и K_4 и падает на анод фотоумножителя, который соединен с электрической цепью, питаемой через фотоумножитель.

Применение фотоумножителей позволяет усилить ток в десятки миллионов раз. Однако при этом требуется высокое напряжение

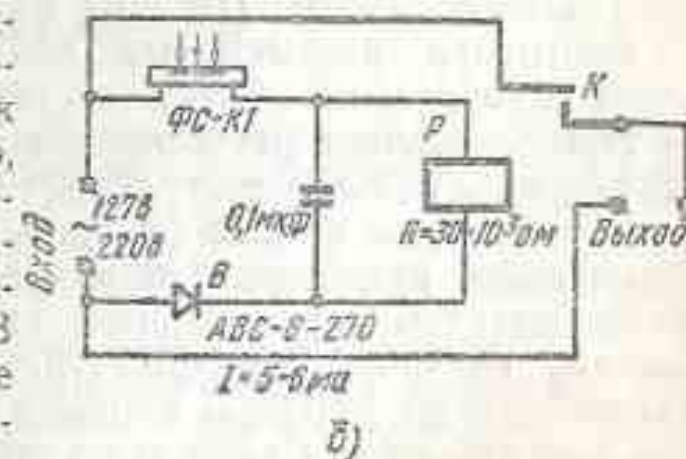
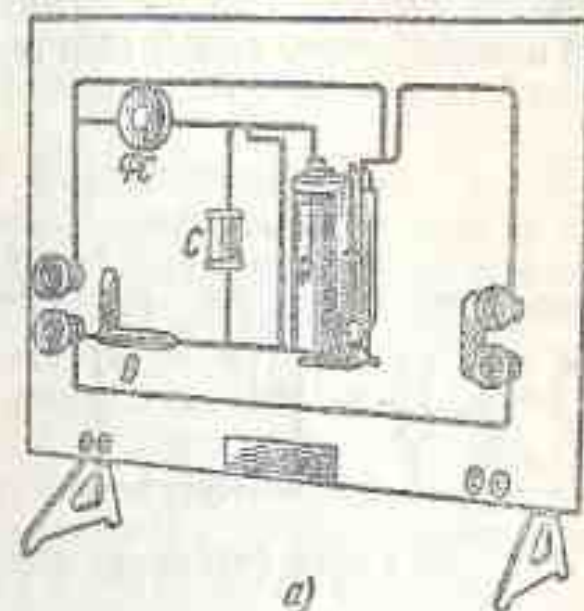


Рис. 226. Фотореле:

а — внешний вид, б — схема, ФК-К1 — фотосопротивление, P — электромагнитное реле, К — контакт, В — соленоидный вентиль, С — конденсатор

(1000—2000 e), так как разность потенциалов между каждой парой соседних эмиттеров должна составлять 100—200 e .

Выходной ток фотоумножителя относительно невелик, не больше нескольких десятков миллиампер, так как назначение фотоумножителя — не получение больших выходных токов, а работа с предельно малыми световыми потоками.

Фотоэлементы широко используются в фотореле. Обычно фотореле представляет собой сочетание фотоэлемента и электромагнитного реле (рис. 226).

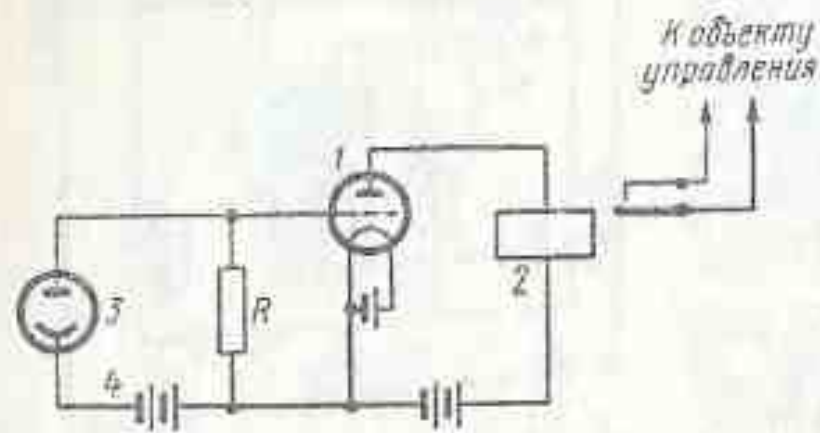


Рис. 227. Схема фотоэлектронного реле

вследствие того, что в темноте фотосопротивление обладает большим сопротивлением (10^7 — 10^8 ом).

Благодаря разомкнутым контактам электромагнитного реле через управляемый объект ток также не протекает — он выключен.

При освещении фотосопротивления его электрическое сопротивление резко уменьшается, через выпрямитель, обмотку электромагнитного реле и фотосопротивление проходит электрический ток. Якорь реле притягивается к сердечнику и замыкает через свои контакты цепь управляющего объекта — включается объект. Поскольку контакты электромагнитного реле телефонного типа не рассчитаны на большую мощность, то при необходимости управления значительной мощностью контакты этого реле, замыкаясь, включают вторичное реле, пружины которого рассчитаны на большую нагрузку — большую силу тока.

Весьма часто для увеличения фототоков используется ламповый усилитель. В этом случае фотореле состоит из фотоэлемента, усилителя и электромагнитного реле. Схема такого фотоэлектронного реле приведена на рис. 227.

В цепь анода усилительной лампы I включе-

но электромагнитное реле 2, к контактам которого присоединяется объект, управляемый этим реле. Фотоэлемент 3 подключается одним концом к сетке лампы, а другим — к батарее 4.

При освещении фотоэлемента на сопротивлении R создается падение напряжения и на сетке лампы поддерживается отрицательное напряжение по отношению к катоду. Лампа в этом случае заперта, в цепи анода тока нет. Когда же освещение фотоэлемента прекращается, через лампу в цепи анода начинает протекать ток и реле срабатывает, замыкая своими контактами цепь объекта.

На рис. 228 приведена схема фотоэлектрического автомата, который автоматически останавливает ротационную (печатную) машину при обрыве бумаги. Работой автомата управляют три фотосопротивления. В схему автомата включены: первичное электромагнитное реле P_1 , вторичное реле P_2 типа МКУ-48 с контактами, допускающими нагрузку до 1000 ва , и три осветительные лампы.

При обрыве бумаги свет попадает на одно или несколько фотосопротивлений. При этом через первичное реле P_1 проходит достаточной силы ток и его контакты замыкаются. В результате срабатывает вторичное реле P_2 , которое размыкает цепь двигателя машины. Машина автоматически останавливается.

Когда фотосопротивление затемнено, сила тока в его цепи очень мала

вследствие того, что в темноте фотосопротивление обладает большим сопротивлением (10^7 — 10^8 ом).

Благодаря разомкнутым контактам электромагнитного реле через управляемый объект ток также не протекает — он выключен.

При освещении фотосопротивления его электрическое сопротивление резко уменьшается, через выпрямитель, обмотку электромагнитного реле и фотосопротивление проходит электрический ток. Якорь реле притягивается к сердечнику и замыкает через свои контакты цепь управляющего объекта — включается объект. Поскольку контакты электромагнитного реле телефонного типа не рассчитаны на большую мощность, то при необходимости управления значительной мощностью контакты этого реле, замыкаясь, включают вторичное реле, пружины которого рассчитаны на большую нагрузку — большую силу тока.

Весьма часто для увеличения фототоков используется ламповый усилитель. В этом случае фотореле состоит из фотоэлемента, усилителя и электромагнитного реле. Схема такого фотоэлектронного реле приведена на рис. 227.

В цепь анода усилительной лампы I включе-

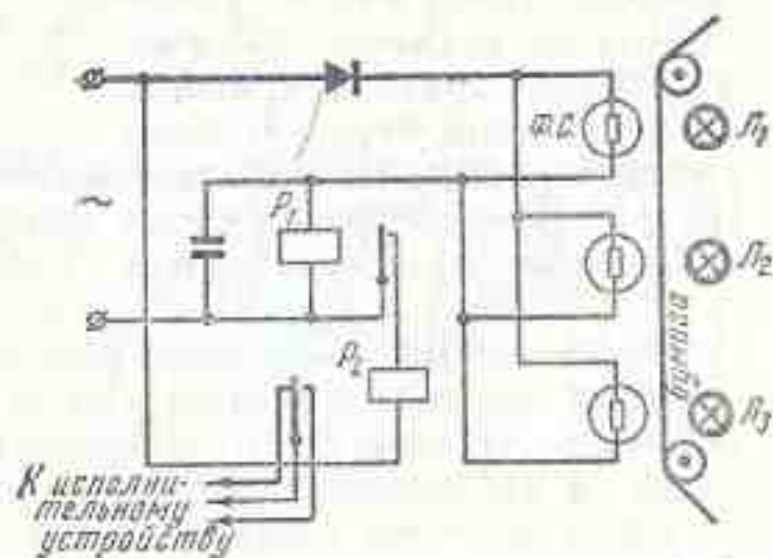


Рис. 228. Схема применения фотосопротивлений в фотоэлектрическом автомате

Контрольные вопросы

1. Каково строение атомов германия?
2. Чем отличается электронная проводимость полупроводников от дырочной?
3. При каком условии полупроводниковый диод пропускает электрический ток?
4. Как устроен селеновый вентиль?
5. Чем отличается выпрямленное напряжение до фильтра при однополупериодном выпрямлении?
6. Сколько p — n -переходов имеет полупроводниковый триод?
7. Назовите и изобразите три основные схемы включения транзистора.
8. Как устроен и действует фотоэлемент с внешним фотоэффектом?
9. Для чего служит фотоумножитель?
10. Из каких элементов состоит фотоэлектронное реле?

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I. Электростатика	5
1. Понятие об электронной теории строения вещества	6
2. Взаимодействие зарядов. Закон Кулона	8
3. Электризация тел	10
4. Электрическое поле	11
5. Потенциал	13
6. Напряженность поля	14
7. Понятие об электрическом токе	15
8. Проводники и диэлектрики	16
9. Электрическая емкость. Конденсаторы	17
10. Заряд и разряд конденсатора	20
11. Соединения конденсаторов	23
12. Понятие об электронном способе обработки металлов	25
Глава II. Постоянный ток	25
13. Электрическая цепь постоянного тока	27
14. Электродвижущая сила	27
15. Электрическое сопротивление	30
16. Закон Ома	33
17. Последовательное соединение сопротивлений	36
18. Первый закон Кирхгофа	37
19. Параллельное соединение сопротивлений	40
20. Смешанное соединение сопротивлений	41
21. Второй закон Кирхгофа	43
22. Работа и мощность электрического тока	46
23. Коэффициент полезного действия или отдача	47
24. Закон Ленца — Джоуля	49
25. Нагревание проводников электрическим током	50
26. Электрическая дуга	53
27. Химическое действие электрического тока	56
28. Гальванические элементы	60
29. Аккумуляторы	68
30. Атомные элементы	69
31. Термоэлементы	71
32. Солнечные батареи	73
Глава III. Электромагнетизм и электромагнитная индукция	73
33. Общие сведения	74
34. Магнитное поле электрического тока	75
35. Понятие о природе магнетизма	76
36. Магнитная индукция	78
37. Напряженность магнитного поля	79
38. Магнитный поток	80
39. Намагничивание стали. Магнитная проницаемость	82
40. Перемагничивание стали. Коэрцитивная сила	84
41. Потери энергии на перемагничивание	84
42. Электромагниты и их применение	84

43. Электромагнитная индукция	88
44. Самоиндукция. Индуктивность	91
45. Величина и направление э. д. с. самоиндукции	94
46. Взаиминдукция	95
47. Вихревые токи	96
Глава IV. Однофазный переменный ток	98
48. Получение переменной электродвижущей силы	98
49. Основные величины, характеризующие переменный ток	100
50. Понятие о сложении переменных напряжений и токов	104
51. Понятие о векторах и векторных диаграммах	105
52. Активное сопротивление в цепи переменного тока	107
53. Индуктивность в цепи переменного тока	108
54. Емкость в цепи переменного тока	112
55. Цепь переменного тока с активным и индуктивным сопротивлениями	115
56. Цепь переменного тока с активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями	118
57. Цепь переменного тока с параллельно соединенными сопротивлениями	119
58. Понятие о резонансе напряжений	122
59. Понятие о резонансе токов	124
60. Мощность однофазного переменного тока	126
Глава V. Трехфазная система переменного тока	130
61. Трехфазные генераторы	130
62. Соединения обмоток генератора	131
63. Включение нагрузки в сеть трехфазного тока	135
64. Мощность трехфазного тока	137
65. Вращающееся магнитное поле	139
Глава VI. Электрические измерительные приборы и измерения	145
66. Общие сведения	145
67. Электромагнитные приборы	151
68. Магнитоэлектрические приборы	153
69. Термоэлектрические приборы	154
70. Электродинамические приборы	155
71. Индукционные приборы	156
72. Измерение силы тока. Расширение пределов измерения амперметра	158
73. Измерение напряжения. Расширение пределов измерения вольтметра	159
74. Измерение сопротивлений	160
75. Мегомметр	162
76. Универсальный электроизмерительный прибор	164
77. Мост для измерения сопротивлений	165
78. Измерение электрической мощности и энергии	166
79. Понятие об измерении неэлектрических величин	167
Глава VII. Трансформаторы	172
80. Общие сведения о трансформаторах	172
81. Принцип действия и устройство трансформатора	174
82. Рабочий процесс трансформатора	178
83. Трехфазные трансформаторы	182
84. Опыт холостого хода и короткого замыкания	184
85. Определение рабочих свойств трансформаторов по данным опытов холостого хода и короткого замыкания	186
86. Автотрансформаторы	189
87. Измерительные трансформаторы	191
Глава VIII. Асинхронные двигатели	194
88. Общие положения	194
89. Принцип действия асинхронного двигателя	195
90. Обмотки машины переменного тока	198
91. Устройство асинхронного двигателя	200
92. Работа асинхронного двигателя под нагрузкой	202

93.	Вращающий момент асинхронного двигателя	204
94.	Рабочие характеристики асинхронного двигателя	207
95.	Пуск и ход асинхронных двигателей	209
96.	Двигатели с улучшенными пусковыми свойствами	210
97.	Регулирование скорости вращения трехфазных асинхронных двигателей	212
98.	Однофазные асинхронные двигатели	214
Глава IX.	Синхронные машины	219
99.	Общие замечания	219
100.	Принцип действия синхронного генератора	220
101.	Устройство синхронного генератора	221
102.	Работа синхронного генератора под нагрузкой	223
103.	Синхронные двигатели	227
Глава X.	Машины постоянного тока	230
104.	Принцип действия генератора постоянного тока	230
105.	Устройство генератора постоянного тока	231
106.	Обмотки якорей машин постоянного тока	233
107.	Э. д. с. машин постоянного тока	236
108.	Магнитное поле машины постоянного тока при нагрузке	237
109.	Коммутация тока	239
110.	Работа машины постоянного тока в режиме генератора	241
111.	Способы возбуждения генераторов постоянного тока	244
112.	Характеристики генераторов постоянного тока	246
113.	Работа машины постоянного тока в режиме двигателя	252
114.	Пуск двигателей постоянного тока	255
115.	Характеристики двигателей постоянного тока	257
116.	Регулирование скорости вращения двигателей постоянного тока	260
117.	Потери и к. п. д. машин постоянного тока	261
118.	Коллекторные двигатели переменного тока	262
Глава XI.	Электрическая аппаратура управления и защиты	265
119.	Выключатели и рубильники	265
120.	Автоматы	268
121.	Предохранители	268
122.	Ресистаты	270
123.	Контроллеры	271
124.	Контактор. Магнитный пускатель	271
125.	Тепловое реле	275
Глава XII.	Производство, передача и распределение электрической энергии	277
126.	Производство и передача электрической энергии	277
127.	Трансформаторные подстанции	279
128.	Оборудование трансформаторных подстанций	281
129.	Защита электрооборудования	287
Глава XIII.	Электровакuumные приборы	290
130.	Электронная эмиссия	290
131.	Двухэлектродная лампа (диод)	291
132.	Характеристика и параметры диода	294
133.	Выпрямление переменного тока	296
134.	Трехэлектродная лампа (триод)	299
135.	Характеристика и параметры триода	301
136.	Принцип усиления электрических колебаний	304
137.	Ламповый генератор	305
138.	Триод в электронном реле	308
139.	Четырехэлектродная лампа (тетрод)	308
140.	Пятиэлектродная лампа (пентод)	310
141.	Электроннолучевая трубка. Осциллограф	312
Глава XIV.	Газоразрядные приборы	318
142.	Ионные приборы	318
143.	Неоновая лампа	321
144.	Газосветная лампа	323

145.	Стабилитрон	324
146.	Тиратрон	326
147.	Ртутый выпрямитель	328
148.	Газоразрядный счетчик радиоактивных излучений	330
Глава XV.	Полупроводниковые приборы	332
149.	Строение и электропроводность полупроводников	332
150.	Понятие об электронной и дырочной проводимости	333
151.	Примесная проводимость полупроводника	334
152.	Образование электронно-дырочного перехода	335
153.	Полупроводниковые диоды	337
154.	Полупроводниковые выпрямители	340
155.	Транзисторы	342
156.	Тиристоры	346
157.	Фотоэлементы и фотореле	348

Китаев Валентин Евгеньевич
Шляпинтох Лев Самойлович

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
С ОСНОВАМИ
ПРОМЫШЛЕННОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ

Редактор Г. А. Сильвестровиц
Художник В. И. Сидоренко
Художественный редактор Т. В. Панина
Технический редактор Е. И. Герасимова
Корректор М. И. Коллоз

Г—00311. Сдано в набор 19/V 1973 г. Подп. к печати
24/I 1973 г. Формат 60×90¹/₂. Объем 21,5 печ. л. Уч.-изд.
л. 23,99. Изд. № ЭГ—163. Тираж 200 000 экз. Цена 68 коп.
Зак. № 306.

План выпуска литературы
для профтехобразования издательства
«Высшая школа» на 1973 г. Позиция № 34
Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14,
Издательство «Высшая школа»

Типография изд-ва «Уральский рабочий»,
г. Свердловск, пр. Ленина, 49.

68 коп.