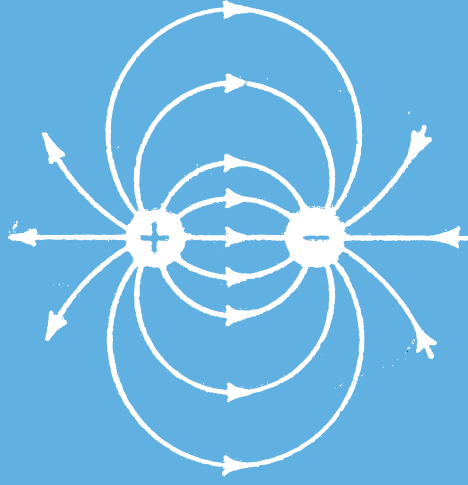


ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



Н. Д. ПАСЕЧНИК

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ
*Десятое
исправленное
издание* **ЭЛЕКТРО-**
ТЕХНИКА

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНІКА»
Киев — 1965

В книге в простой и доступной форме изложены основные законы электротехники, даны краткие сведения об источниках тока, машинах постоянного и переменного тока, электронных лампах, ионных приборах, основных электроматериалах и электрических измерениях.

Особое внимание уделено объяснению физической сущности явлений.

Применение приведенных в книге формул показано на примерах и задачах.

Книга предназначена для электромонтеров и может служить пособием для курсовой сети.

Редакция литературы по энергетике, электронике, кибернетике и связи

Заведующий редакцией инж. Р. П. Рак.

Развитие техники во многом обязано развитию науки об электричестве.

В этой области выдающихся успехов достигли русские ученые.

Электрические явления были известны задолго до нашей эры. Однако природа этих явлений долгое время оставалась неизвестной. Впервые научное объяснение электрических явлений дал Михаил Васильевич Ломоносов, особо подчеркнувший «возможность передачи электрической силы на значительные расстояния при помощи изолированной проволоки».

В сохранившейся до нашего времени рукописи «Теория электричества, математическим способом разработанная автором Ломоносовым» в отличие от существовавших в его время воззрений, утверждавших, что электричество есть некая жидкость, Ломоносов доказал, что «электрическая сила есть действие».

Свои работы по изучению электрических явлений Ломоносов проводил совместно с Г. В. Рихманом.

До последней четверти XVIII в. были известны только явления статического электричества.

В 1800 г. итальянским физиком Александро Вольта впервые был создан источник непрерывного электрического тока — вольтов столб. Этот источник сыграл большую роль в развитии науки об электричестве и в расширении его практического применения.

Крупнейшие ученые первой половины XIX в. — Василий Владимирович Петров, Гемфри Дэви, Андре Мари Ампер, Майкл Фарадей — широко применяли вольтов столб для своих опытов.

Будучи хорошо знакомым с опытами, производящимися с вольтовым столбом и гальваническими элементами как в России, так и за границей, Василий Владими-

рович Петров в 1802 г. собрал батарею из 2100 гальванических элементов. При помощи этой батареи он в этом же году получил электрическую дугу.

Десять лет спустя электрическая дуга была получена англичанином Гемфри Дэви.

В. В. Петров впервые в своих трудах доказал возможность практического применения электричества, а также первый высказал мысль о возможности применения электрического тока для освещения и плавки металлов.

В 1802 г. была издана книга Петрова «Известие о гальвани-вольтовых опытах, которые производил профессор физики Василий Петров посредством огромной наипатче батареи, состоявшей иногда из 2100 медных и цинковых кружков».

В своей книге он писал: «Я надеюсь, что просвещенные и беспристрастные физики по крайней мере некогда согласятся отдать трудам моим ту справедливость, которую важность сих последних опытов заслуживает».

Петров является одним из предшественников немецкого физика Георга Симона Ома, сформулировавшего в 1827 г. известный закон, носящий его имя.

Самое большое значение имеет открытое Петровым в 1802 г. явление электрической дуги. До Петрова физики не могли наблюдать явление дуги, так как они применяли небольшие гальванические элементы.

Расширение и углубление исследований электрических явлений привели к открытию и изучению новых свойств электрического тока.

В 1820 г. были опубликованы и продемонстрированы опыты датского физика Ханса Кристиана Эрстеда, установившего действие тока на магнитную стрелку.

В этом же году французский физик Доминик Франсуа Араго обнаружил новое явление — намагничивание проводника протекающим по нему током.

Французские ученые Жан Батист Био и Феликс Савар установили закон действия тока на магнит, а Андре Мари Ампер впервые предложил термин «электрический ток» и ввел в науку понятие о направлении электрического тока.

Немецкий физик Густав Роберт Кирхгоф в 1847 г. сформулировал законы, устанавливающие связь между электродвижущими силами разветвленной цепи.

Эти открытия подготовили почву для открытия явления электромагнитной индукции и последующего бурного развития электротехники. Явление электромагнитной индукции впервые было открыто в 1831 г. выдающимся английским ученым Майклом Фарадеем.

Академик Эмилий Христианович Ленц существенно дополнил законы электромагнитной индукции Фарадея, установив правило, которое получило название «правило Ленца».

В своих опытах Фарадей применил устройство, которое можно назвать прототипом трансформатора.

Одновременно с английским физиком Джемсом Джоулем Ленц установил закон, определяющий количество тепла, выделяемого при прохождении электрического тока через какой-либо проводник. Как известно, закон определения количества тепла, выделяемого током в проводнике, носит название закона Джоуля — Ленца.

Совместно с Якоби Ленц разработал теорию электромагнитов и своими работами во многом способствовал развитию современной теории электротехнических машин.

Академик Борис Семенович Якоби создал первый электрический двигатель. Такой двигатель был установлен на первом в мире электроходе и приводился в действие от гальванической батареи из 200 элементов. Электроход успешно плавал по Неве, поднимая 12 пассажиров и развивая скорость более 2 верст в час.

В 1839 г. Якоби открыл явление гальванопластики и детально разработал технику практического использования этого явления. За это величайшее открытие Якоби получил Демидовскую премию русской Академии наук и Большую золотую медаль французской Академии наук. Желая документально закрепить свое открытие за Россией, Якоби 5 сентября 1839 г. передал президенту Академии наук Сергею Семеновичу Уварову письмо с приложением гальванопластической копии. В 1840 г. он выпустил свою книгу «Гальванопластика».

Павел Львович Шиллинг применил влияние тока на магнитную стрелку для передачи на расстояние условных телеграфных сообщений.

До начала 70-х годов прошлого века было создано и апробировано несколько типов электрических ламп. Однако ни одна из них не вышла за пределы лабораторного эксперимента.

Павел Николаевич Яблочков и Александр Николаевич Лодыгин разработали приборы электрического освещения, которые применялись для освещения улиц.

В 1874 г. Яблочков применил первую в мире прожекторную установку с электрической дугой, установленную на паровозе для освещения железнодорожного полотна.

Сконструированная им электрическая лампа получила наименование «свечи Яблочкова». 23 марта 1876 г. Яблочков получил во Франции привилегию на электрическую лампу.

Эта привилегия ознаменовала начало новой эпохи в истории электротехники. Началось широкое распространение свечей не только в Париже, но и в других крупных центрах Европы. Для равномерного сгорания обоих углей Яблочков применил переменный ток. Питание свечей переменным током осуществлялось от специального генератора.

Яблочков первый применил трансформатор.

Имя Лодыгина связано с созданием электрической лампы накаливания. Первая демонстрация ламп накаливания состоялась в 1873 г. Об этом событии Н. В. Попов справедливо заметил: «Лодыгин первый сделал лампу накаливания орудием техники. Лодыгин первый вынес лампу накаливания из физического кабинета на улицу...»

За открытие, «обещающее привести переворот в важном вопросе об освещении», Академия наук присудила Лодыгину в 1874 г. Ломоносовскую премию.

В 1890 г. Лодыгин получил патент на лампы накаливания с металлической нитью из вольфрама, молибдена, иридия, палладия. Таким образом, он является создателем современной лампы накаливания.

Во второй половине 70-х годов проблемой ламп накаливания занялся американский ученый Т. А. Эдисон.

Как известно, Верховный суд США в 1894 г. признал, что Эдисон не имеет приоритета в изобретении лампы накаливания.

Современником Яблочкова и Лодыгина был Владимир Николаевич Чиколев — выдающийся русский электротехник-изобретатель. Одной из важнейших заслуг Чиколева является его работа в области теории электротехники. Он был одним из организаторов электротехнического отдела Политехнического музея в Москве. В 1880 г.

Чиколев и сплотившаяся вокруг него группа русских электротехников через русское техническое общество издали первый в России электротехнический журнал «Электричество». Первым редактором этого журнала был Чиколев. Чиколев и его сотрудник Роберт Эдуардович К л а с с о н много работали над конструкциями и теорией прожекторов.

Передается электроэнергия на дальние расстояния в настоящее время в большинстве случаев в виде переменного трехфазного тока.

Впервые трехфазный ток применил Михаил Осипович Д о л и в о - Д о б р о в о л ь с к и й. Он же разрешил вопрос передачи переменного тока на большие расстояния и, что особенно важно, в 1889 г. построил первый асинхронный двигатель трехфазного переменного тока.

Изобретение радио принадлежит русскому изобретателю профессору А. С. П о п о в у. Попов один из первых обратил внимание на работы немецкого физика Генриха Рудольфа Герца, экспериментально доказавшего в 1888 г. существование электромагнитных волн, теоретически предсказанных Джемсом Клерком Максвеллом.

Позднее русский физик Петр Николаевич Л е б е д е в открыл световое давление и из опытов определил его величину, совпадающую со значениями, вычисленными по теории Максвелла.

Русские инженеры были пионерами в разработке практических способов электросварки.

В этой области многое было сделано Николаем Николаевичем Б е н а р д о с о м и Николаем Гавриловичем С л а в я н о в ы м. Н. Н. Бенардос построил электросварочный аппарат с угольными электродами. Н. Г. Славянов при электросварке заменил угольный электрод стержнем из того же металла, что и свариваемый предмет.

Развитие электротехники в России пошло гигантскими шагами после Великой Октябрьской социалистической революции.

Развитие электротехники в стране победившего социализма стало государственным делом. На VIII съезде Советов по докладу В. И. Ленина был принят исторический план ГОЭЛРО. До Октябрьской революции было много проектов использования водной энергии Днепра.

Иван Гаврилович А л е к с а н д р о в создал грандиозный проект, разрешавший одновременно проблему

электроснабжения нижнего Приднепровья и проблему судоходства на Днепре.

Строительство Днепровской гидроэлектростанции с длиной плотины более $\frac{3}{4}$ км и мощностью (до 1941 г.) 810 тыс. л. с. было закончено в 1932 г.

Одним из крупнейших инженеров-энергетиков в СССР был академик Г. О. Графтио — строитель первых

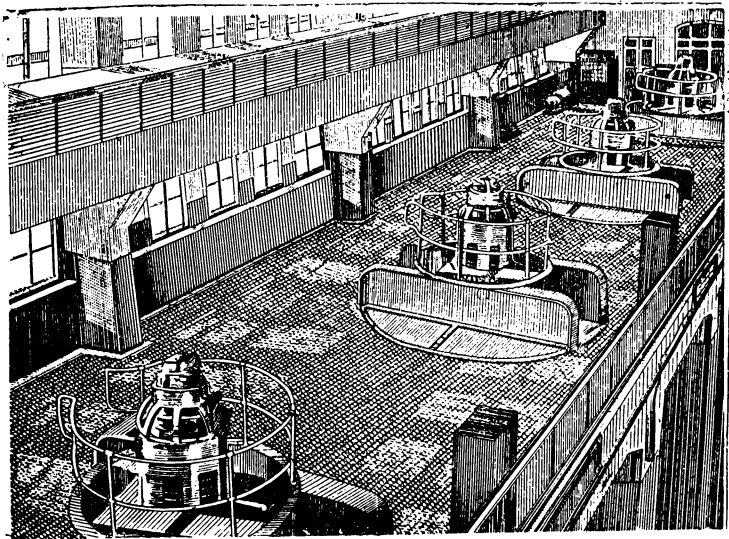


Рис. 1. Электростанция, управляемая автоматически на расстоянии.

советских гидроэлектростанций: Волховской и Нижне-Свирской, последняя носит теперь его имя.

Талантливые советские ученые Николай Дмитриевич Папалекси и Леонид Исаакович Мандельштам, работавшие многие годы совместно, создали новый тип машин переменного тока — параметрический генератор. Папалекси первый указал пути для конструирования генераторов повышенной частоты от 300 до 30 000 гц и был награжден премией Д. И. Менделеева за выдающиеся научные работы в области распространения электромагнитных волн.

Академик Клавдий Ипполитович Шенфер известен среди электриков как крупнейший исследователь и изобретатель электрических машин.

В области создания техники высоких напряжений выдающиеся работы были выполнены советским исследователем и экспериментатором, заслуженным деятелем науки и техники профессором Александром Антоновичем С м у р о в ы м. Он разработал совершенные схемы защиты электрических сетей от перенапряжений.

О передаче энергии на большие расстояния и расчете электрических сетей широко известны работы академика Академии наук УССР Василия Михайловича Х р у щ е в а.

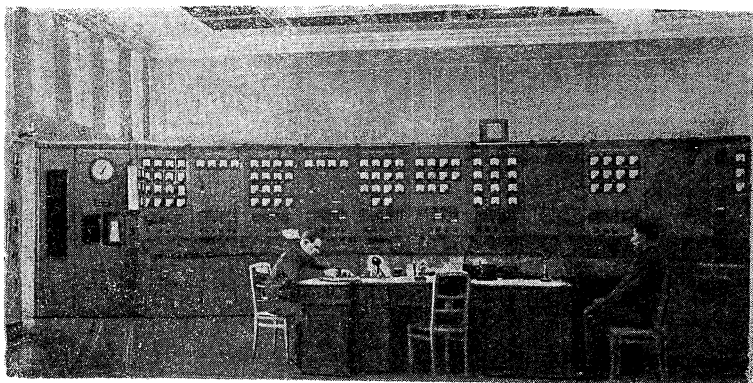


Рис. 2. Пульт управления автоматической электростанции.

Организатор знаменитой Нижегородской радиолaborатории Михаил Александрович Б о н ч-Б р у е в и ч получил в свое время высокую оценку проводимых им работ от Владимира Ильича Ленина. Член-корреспондент Академии наук СССР Михаил Александрович Бонч-Бруевич был конструктором первых мощных советских электронных ламп.

Коммунистическая партия всегда считала первой своей задачей обеспечение высоких темпов электрификации народного хозяйства, так как она служит основой технического прогресса и повышения технической вооруженности труда.

Наша страна вступает в решающую стадию осуществления сплошной электрификации. В настоящее время в Советском Союзе каждые три дня вырабатывается столько энергии, сколько вырабатывалось до Октябрьской революции во всей России за год.

Большие и ответственные задачи поставлены Партией и Правительством перед энергетиками. К концу 1965 г. им предстоит выработать 960 млрд. *квт·ч* электроэнергии, ввести в эксплуатацию более 21 млн. *квт* новых мощностей, из них миллионы киловатт — непосредственно для химической индустрии, 245 тыс. *км* электросетей для дальнейшей электрификации сельского хозяйства и десятки тысяч километров магистральных линий электропередач.

В 1965 г. будет закончена разработка проектно-технической документации и развернуто строительство электростанций для установки первых агрегатов единичной мощностью 500 и 800 тыс. *квт*.

В настоящее время ведутся работы по созданию единой энергетической системы СССР. Недавно было осуществлено опытное объединение трех сибирских энергосистем: Красноярской, Иркутской и объединенной системы Западной Сибири.

Эти задачи могут быть успешно решены только на основе широкого внедрения новой техники, комплексной механизации и автоматизации производственных процессов. Управление всеми электростанциями и их эксплуатация будут осуществляться средствами автоматики и телемеханики (рис. 1, 2).

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ

§ 1. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Электричеством называют одну из разновидностей энергии. Энергия может существовать в разных видах. Энергией обладает ветер, вращающий крылья ветряных мельниц или раздувающий паруса кораблей и тем сообщающий им движение. Энергия ветра является *механической энергией*. Водопад, вращающий колеса турбин, также включает в себе механическую энергию. Уголь, нефть, дерево, порох содержат в себе энергию в скрытом виде. Эта энергия называется *химической*.

Энергия может переходить из одного вида в другой. Так, например, энергию движения воды в реке можно при помощи машин превратить из механической в электрическую. Многие химические процессы, связанные с превращением одного сложного вещества в другое, сопровождаются выделением электрической энергии. Химическая энергия при сгорании угля переходит в тепловую. Тепло, в свою очередь, можно использовать для образования и расширения пара и получить механическую энергию. *Механическая энергия* давления пара на поршень паровой машины может быть передана электрической машине, которая преобразует ее в *электрическую* энергию.

Наука, изучающая явления, связанные с разнообразными проявлениями электричества, и указывающая пути его применения, называется электротехникой.

Название «электричество» происходит от греческого слова «электрон». Так по-гречески называется янтарь. Греки в VII веке до н. э. добывали электричество натиранием янтарной палочки шерстью. При этом на палочке

возникал электрический заряд. Заряженная электричеством палочка притягивает к себе легкие предметы: кусочки бумаги, небольшие пробковые шарики.

Это притяжение объясняется тем, что в процессе натирания палочки шерстью палочка и шерсть заряжаются электричеством по-разному. Появление электричества на палочке называют *отрицательной электризацией*. В отличие от нее электризация шерсти, которой пользовались для натирания, будет *положительной*.

Из наблюдения этого явления видно, что тела, имеющие положительную и отрицательную электризацию (содержащие положительные и отрицательные заряды), притягиваются друг к другу.

В противоположность этому тела, имеющие электрические заряды одинакового знака, отталкиваются.

§ 2. АТОМЫ, ЭЛЕКТРОНЫ И ПРОТОНЫ

Как же объясняет современная наука то обстоятельство, что электричество существует в природе в виде положительных и отрицательных зарядов?

Дело в том, что все без исключения тела, все предметы, окружающие нас, состоят из мельчайших частиц, называемых молекулами.

Молекула — это маленькая частица вещества, сохраняющая в себе его химические особенности. Все химические превращения сложных веществ из одного в другое происходят в результате взаимодействия между молекулами, из которых эти вещества состоят.

Молекулы имеют сложное устройство и не являются самыми маленькими частицами, существующими в природе. Каждая молекула состоит из *атомов*. Атомы служат как бы строительным материалом химически простых веществ. Химически простые вещества, состоящие из атомов одинакового вида, называются *химическими элементами*.

Химическими элементами являются: медь, железо, сера, кислород, водород и другие. Сейчас известен 101 элемент. Элементы принято обозначать одной или двумя начальными буквами их латинских названий, так, например, водород — Н, кислород — О, сера — S, железо — Fe, медь — Cu.

Вода, серная кислота и все другие сложные вещества обозначаются несколькими буквами. Химическая формула воды — H_2O , а серной кислоты — H_2SO_4 . Это означает, что молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода. Молекулу серной кислоты составляют два атома водорода, атом серы и четыре атома кислорода. Атомы химически чистых элементов связаны между собой по определенному закону. Его называют *периодическим законом* химических элементов. Это один из главных законов природы. Его открыл наш великий ученый Дмитрий Иванович Менделеев. Величайшее открытие русского ученого позволило предсказать наличие и описать свойства новых химических элементов в природе, которые при жизни Менделеева еще были не известны. В наше время все предсказания великого ученого сбылись, и ранее неизвестные элементы уже найдены.

О существовании атомов догадывались еще древние греки. Две тысячи четыреста лет тому назад греческий философ Демокрит Абдерский считал, что все состоит из мельчайших частиц — атомов. Атом — слово греческое, и оно означает «неделимый». До самого конца предыдущего века полагали, что атом разделить нельзя. Однако теперь доказано, что атом имеет сложное строение. Каждый атом состоит из ядра и вращающихся вокруг него электронов. Атомы разных химических элементов содержат различное число электронов. Атом водорода имеет один электрон (рис. 3), атом кислорода более сложен и состоит из ядра и восьми электронов.



Рис. 3. Атом водорода.

Ядро атома занимает ничтожную часть его объема, но в нем сосредоточена почти вся масса атома. Ядро атома состоит из частиц двух видов: *протонов и нейтронов*.

Масса электрона в 1840 раз меньше массы протона. Вес электрона меньше одного грамма во столько раз, во сколько один грамм меньше веса земного шара. Все электроны имеют одинаковые отрицательные заряды электричества. Этот заряд настолько мал, что другого, меньшего по величине, в природе обнаружить не удалось. Чтобы представить себе, насколько мал электрон, достаточно сказать, что через раскаленную нить электрической

лампочки в одну секунду проходит около трех квадрильонов электронов.

Протоны имеют положительный заряд электричества, нейтроны электрических зарядов не содержат. В ядре атома протоны и нейтроны связаны так, что разделить ядро на составные части очень трудно. Только при особых условиях можно расщепить ядро атома, обстреливая его нейтронами. Расщепление ядра сопровождается выделением колоссального количества энергии. В атомных ядрах одного грамма какого-либо вещества сосредоточена энергия, равная 25 млн. квт.ч.

Энергии, содержащейся в атомных ядрах одного грамма каменного угля, достаточно, чтобы товарный поезд мог четыре с половиной раза обойти земной шар по экватору.

Электрический заряд ядра равен сумме зарядов электронов, окружающих его, но противоположен им по знаку. Поэтому внутри ядра постоянно действуют силы притяжения. Если у атома отнять один или несколько электронов, то в нем будет преобладать положительный заряд ядра. Такой атом называют *положительным ионом*.

В том случае, когда в атом включаются дополнительные электроны, их отрицательные заряды начинают преобладать над положительным зарядом ядра. Такой атом называют *отрицательным ионом*. Образование ионов называется *ионизацией*.

Разумеется, что между ионами, имеющими электрические заряды разных знаков, действуют силы притяжения, а ионы с одинаковыми по знаку зарядами отталкиваются.

§ 3. ПРОВОДНИКИ И ИЗОЛЯТОРЫ

Существующие в природе вещества можно разделить на две большие категории, отличающиеся по своим электрическим качествам. Одни из них называются *проводниками*, а другие — *изоляторами или диэлектриками*.

В атомных ядрах проводников некоторые электроны слабо связаны с ядрами и поэтому легко оставляют атом. Такие электроны называются *свободными*. Свободные электроны постоянно перемещаются и находятся в беспорядочном движении внутри проводника. В процессе этого движения электроны сталкиваются с молекулами

и выбивают из них новые свободные электроны. На место вылетевших электронов становятся электроны, вызвавшие это явление.

Если на проводник действует внешнее электрическое поле, то беспорядочное движение свободных электронов сменяется движением, направленным в одну сторону.

Хорошими проводниками электричества являются металлы, уголь, водные растворы кислот и солей. В электротехнике чаще всего применяются медные, алюминиевые и стальные проводники.

Изоляторы не имеют свободных электронов. В них электроны под действием внешнего электрического поля только отклоняются от своего обычного пути движения вокруг ядра, не оставляя атома. К ним относятся: стекло, мрамор, фарфор, резина, эбонит, воск и другие.

К изоляторам относятся также минеральные масла, воздух, различные лаки. Они почти совсем не пропускают электрического постоянного тока.

Кроме этих двух крайних по электрическим свойствам категорий веществ, имеются и такие, которые занимают промежуточное положение. Их называют *полупроводниками*.

К полупроводникам относят: селен, закись меди, сернистый кадмий, германий, сернистый свинец и др.

Кроме металлических проводников, называемых *проводниками первого рода*, в электротехнике применяют и *проводники второго рода* — растворы кислот, солей и щелочей. Растворы подобного рода называют *электролитами*. В проводниках второго рода молекулы состоят из положительных и отрицательных ионов. Если в раствор поместить два металлических стержня, соединенных с источником электрической энергии, то ионы будут перемещаться, направляясь в сторону зарядов соответствующего знака.

Не следует забывать, что в природе не существует ни идеальных проводников, ни идеальных изоляторов.

§ 4. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ ИНДУКЦИЯ

Если на некотором расстоянии от проводника расположить электрически заряженное тело, то оказывается, что в проводнике также появляются электрические заряды. При этом на том конце проводника, который ближе

к подносимому заряженному телу, возникает заряд, противоположный по знаку заряду тела. На другом конце проводника появится заряд такой же по знаку и по величине, как и заряд подносимого тела. Явление возникновения электрических зарядов на расстоянии называется *электростатической индукцией*.

Если тело, заряженное электричеством, удалить, то индуцируемые в проводнике заряды исчезнут. Однако при некоторых условиях эти заряды можно сохранить.

Для этого необходимо взять проводник, состоящий из двух частей.

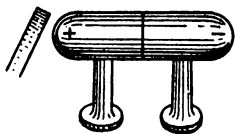


Рис. 4. Возникновение электрических зарядов на расстоянии.

Каждая часть такого проводника укреплена на изолирующей подставке, как это показано на рис. 4.

После того как в двух половинах такого разрезанного проводника появятся разные по знаку заряды, надо эти половинки разъединить.

Оказывается, что даже после удаления индуцирующего эти заряды тела на одной половине проводника сохранится положительный электрический заряд, а на другой — отрицательный.

Описанное выше явление можно объяснить так: при появлении вблизи проводника тела, имеющего заряд определенного знака, свободные электроны в проводнике сосредоточатся на одном из его концов в зависимости от знака поднесенного заряда. Если заряд тела положительный, то свободные электроны сосредоточиваются ближе к нему, так как они будут притягиваться положительным зарядом. Если заряд тела отрицательный, электроны, отталкиваясь от него, сосредоточатся на дальнем конце проводника.

Таким образом, наличие индуцирующего тела приводит к разделению электрических зарядов, которые до этого в проводнике находились в беспорядочном движении.

§ 5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Свободные электроны в телах, проводящих электричество, находятся в постоянном движении, но это движение не имеет определенного направления. Электроны без какой-либо закономерности перемещаются между моле-

кулами с различной скоростью в разные стороны. Но такое беспорядочное движение продолжается только до тех пор, пока к концам проводника не приложены внешние электрические силы, которые могут заставить все свободные электроны направиться вдоль проводника в одну определенную сторону. Так, если концы проводника соединить с источником электрической энергии, то все

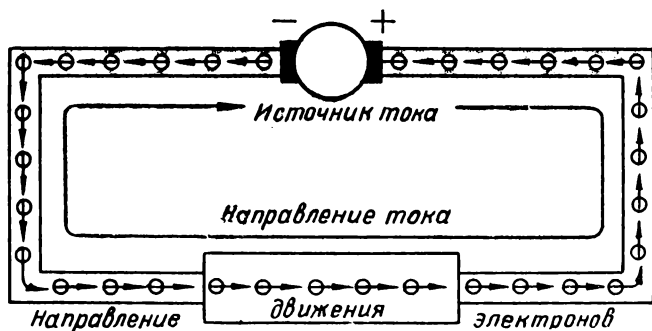


Рис. 5. Направление тока.

электроны в проводнике начнут перемещаться в одном и том же направлении.

Перемещение электронов в проводнике в определенном направлении называется *электрическим током*.

Электроны, представляющие собой отрицательные заряды электричества, перемещаются в сторону положительного полюса источника электрической энергии. Однако в электротехнике принято считать, что *электрический ток направлен всегда от положительного полюса к отрицательному*. Таким образом, направление электрического тока противоположно направлению движения электронов. Это несоответствие сложилось исторически. Дело в том, что в те времена, когда начали изучать электричество, науке еще не было известно строение атома, и тогда предполагали, что электрический ток является следствием перемещения вдоль проводника положительных зарядов, которые идут от положительного полюса источника тока к отрицательному, то есть от плюса к минусу. В наше время продолжают считать по-прежнему, что электрический ток в проводнике, присоединенном к полюсам электрического устройства, вызвавшего этот ток, направлен от плюса к минусу (рис. 5).

Но для того, чтобы движение электрических зарядов могло осуществляться, необходимо создать определенные условия. Первое из этих условий заключается в том, чтобы проводник был соединен с источником электрической энергии, вызывающим перемещение электрических зарядов. И второе, чтобы источник тока и проводник составляли замкнутый контур, по которому может протекать ток. Такой контур называют *электрической цепью*. Только в замкнутой электрической цепи может появиться электрический ток.

ГЛАВА 2

ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

§ 6. ПОСТОЯННЫЙ И ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

В электротехнике применяются две разновидности электрического тока: 1) постоянный и 2) переменный.

Постоянным током называется такой электрический ток, который не изменяется с течением времени ни по величине, ни по направлению.

В отличие от постоянного тока *переменный ток* изменяется как по своей величине, так и по направлению. Если изменения переменного тока происходят периодически, через одинаковые промежутки времени, то такой переменный ток называется *периодическим*. В некоторых отраслях электротехники находят применение и непериодические переменные токи. Так, например, в радиотехнике и телефонии часто применяются токи, которые изменяются по величине и направлению не через одни и те же промежутки времени, значит эти переменные токи нельзя назвать периодическими.

Кроме постоянных и переменных токов, могут быть также токи *пульсирующие*, то есть такие, которые изменяются по величине, но сохраняют одно и то же направление.

Электрический ток, протекающий в проводнике, нельзя увидеть непосредственно, но о его присутствии можно судить по тем разнообразным явлениям, которые он оказывает на живые организмы, на электроизмерительные приборы, электрические машины и аппараты.

§ 7. МАГНИТНОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА

Если параллельно с магнитной стрелкой поместить проводник, по которому проходит электрический ток, то стрелка повернется вокруг своей оси и займет перпендикулярное проводнику положение. При этом стрелка занимает такое положение, которое совпадает с окружностями, лежащими в плоскости, перпендикулярной проводнику, как это показано на рис. 6.

Если ток в проводнике прекратится, магнитная стрелка займет свое обычное положение (концы ее будут указывать на юг и север). Как только ток появится в проводнике, стрелка снова отклонится от своего обычного положения.

Описанное выше явление свидетельствует о том, что вокруг проводника, по которому идет ток, действуют магнитные силы. Эти силы влияют на магнитную стрелку и заставляют ее поворачиваться.

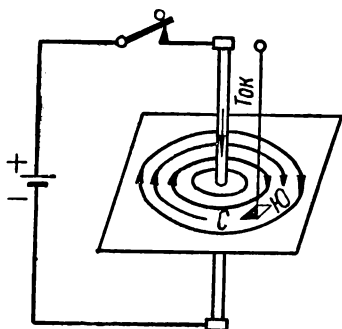


Рис. 6. Направление магнитной стрелки, на которую влияет ток.

§ 8. ХИМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА

Жидкие проводники называют *электролитами*. Если в электролит опустить два проводника и соединить их с источником тока, как это показано на рис. 7, то электрическая цепь, состоящая из источника тока, проводников и жидкости, будет замкнута. Через электролит пойдет ток.

Проводники, опущенные в электролит, называют *электродами*. Тот электрод, по которому ток входит в электролит, называют *анодом*, а другой электрод — *катодом*.

При прохождении тока внутри электролита от анода к катоду расщепленные части молекул — ионы — будут перемещаться в противоположных направлениях. Положительные ионы перемещаются к катоду, а отрицательные — к аноду. Предположим, что электролитом служит раствор соляной кислоты. Химическая формула соляной кислоты — HCl . В растворе молекулы соляной кислоты распадаются на положительные и отрицательные ионы.

Если через такой раствор пропускать ток, то положительные ионы направляются к катоду. Эти положительные ионы называются *катионами*. Отрицательные ионы пойдут к аноду. Их принято называть *анионами*. Катионы электролита соляной кислоты откладываются на катоде и образуют газ — водород (H_2), анионы откладываются на аноде и образуют другой газ — хлор (Cl_2). Таким образом, действие электрического тока выразилось в том,

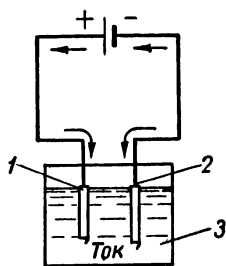


Рис. 7. Прохождение тока через электролит:

1 — анод; 2 — катод;
3 — электролит.

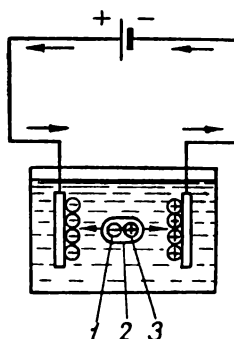


Рис. 8. Химическое действие тока:

1 — анион хлора (Cl^-); 2 — молекула соляной кислоты (HCl); 3 — катион водорода (H^+).

что соляная кислота разделилась на свои составные части (рис. 8).

Такое химическое разложение электролитов под влиянием электрического тока называют *электролизом*. Надо обратить внимание на то обстоятельство, что процессы прохождения электрического тока в электролите и в металлических проводниках отличаются. Если в металлических проводниках перемещаются только отрицательные заряды, то в электролитах в противоположных направлениях перемещаются как положительные, так и отрицательные заряды.

§ 9. ТЕПЛОВОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА

Прохождение электрического тока в проводниках сопровождается выделением тепла.

Энергия электрического тока в проводнике переходит в тепловую, и проводник нагревается до определенной температуры, соответствующей силе тока. Способность тока нагревать проводники широко используется в электротехнике. Одно из первых и наиболее распространенных применений нагревающей способности тока — это электрическое освещение. Для использования тепла, выделяемого током, созданы также электрические нагревательные приборы.

Наличие тока в проводнике можно установить по его нагреванию.

§ 10. ДЕЙСТВИЕ ТОКА НА ЖИВЫЕ ОРГАНИЗМЫ

При обращении с электрическим током не следует забывать, что действие тока на живой организм часто бывает весьма опасным. При прикосновении к незащищенным изоляцией токонесущим проводникам могут получиться значительные ожоги. Но действие тока на человека этим не ограничивается.

Ток действует на нервную систему и может быть опасным для жизни. Поэтому при обращении с током всегда следует соблюдать правила техники безопасности. Для определения наличия тока надо пользоваться измерительными приборами и не прикасаться голыми руками к проводам.

Если возникает необходимость прикоснуться к проводам, в которых есть ток, то следует надевать резиновые перчатки и галоши или становиться на резиновые изолирующие коврики.

§ 11. СИЛА ТОКА

О действии электрического тока можно судить по его силе.

Сила тока зависит от того количества электричества, которое за данный промежуток времени проходит через поперечное сечение проводника.

Ток измеряется количеством электричества, проходящим через поперечное сечение проводника за одну секунду.

О количестве электричества можно судить по суммарному заряду всех электронов, перемещающихся в

проводнике. Для измерения количества электричества применяется единица, которую называют *кулоном*.

Заряд в 1 кулон равен заряду $6,25 \cdot 10^{18}$ электронов.

Если ток обозначить буквой I , количество электричества буквой Q и время, за которое электрический заряд прошел через данное сечение проводника, — t , то силу тока можно получить, разделив количество электричества на количество секунд

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

Силу тока можно определить, измеряя ее в определенных единицах, подобно тому, как вес измеряют в килограммах или длину в метрах. Для измерения силы тока служит специальная единица измерения — *ампер*.

Ампер — это такая сила тока, при которой через поперечное сечение проводника в течение одной секунды проходит один кулон электричества.

Таким образом,

$$1 \text{ а} = 1 \frac{\kappa}{\text{сек}}.$$

Кулон обозначают буквой κ , а ампер — буквой a . Таким образом, вместо того, чтобы написать, что сила тока равна $3a$, принято обозначать так:

$$I = 3 \text{ а}.$$

Для измерения силы тока часто пользуются единицами, составляющими одну тысячную или одну миллионную часть ампера. Одна тысячная часть ампера называется миллиампером, а одна миллионная — микроампером.

Следовательно, $1 \text{ а} = 1000$ миллиампер (ma), а $1 \text{ а} = 1\,000\,000$ микроампер (mka).

Если ток проходит через электролит, то он выделяет из него вполне определенное количество вещества. Это количество вещества тем больше, чем больше сила тока и время прохождения тока через электролит.

Сила тока один ампер при прохождении через раствор азотнокислого серебра в воде за одну секунду выделяет 1,118 миллиграмма серебра.

Количество вещества, выделяемое током силой один ампер из того или иного электролита, бывает разное и называется *электрохимическим эквивалентом вещества*.

Так, например, электрохимический эквивалент серебра равен 1,118 мг, меди — 0,3294 мг и т. д.

Способность тока выделять из растворов металлы широко используется в технике для серебрения, никелирования, золочения и получения точных копий с разных фигур. Покрытие каких-либо металлов тонким слоем другого металла называют *гальваностегией*, получение копий электролизом называют *гальванопластикой*.

Пример 1. За полчаса через данное поперечное сечение проводника прошло 3600 к электричества. Необходимо определить силу тока в проводнике.

Решение. Силу тока можно определить по формуле:

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

Ввиду того, что в формуле время t надо брать в секундах, сначала определим, сколько секунд в получасе:

$$60 \times 30 = 1800 \text{ сек.}$$

Теперь найдем силу тока

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{3600}{1800} = 2 \text{ а.}$$

Пример 2. Определить, какое количество меди выделилось из раствора медного купороса, если через него проходил ток силой 5 а на протяжении 10 мин.

Решение. Время прохождения тока в секундах

$$60 \times 10 = 600 \text{ сек.}$$

Количество меди, выделившееся из раствора, определяется по формуле

$$q = kIt,$$

где q — количество меди, мг;

k — электрохимический эквивалент меди;

I — сила тока, а;

t — время прохождения тока через раствор, сек.

Подставим вместо букв цифры, которые даны в примере, и подсчитаем

$$q = 0,3294 \times 5 \times 600 = 988,2 \text{ мг} \approx 1 \text{ г.}$$

Пример 3. Две металлические ложки опущены в электролитическую ванну с раствором азотнокислого серебра. Полная поверхность каждой ложки равна 1 дм². Чтобы покрыть ложки слоем серебра, через электролит пропускается ток в течение 3 ч. Плотность тока равна 0,5 а на 1 дм². Удельный вес серебра 10,5 $\frac{\text{г}}{\text{см}^3}$.

Какой толщины слой серебра отложится на каждой ложке за 3 ч работы электролитической ванны?

Решение. Общая площадь поверхности двух ложек

$$1 \times 2 = 2 \text{ дм}^2 = 200 \text{ см}^2.$$

Ток, проходящий через обе ложки,

$$I = 0,5 \times 2 = 1 \text{ а.}$$

Вес серебра, которое выделилось на ложках за 3 ч,

$$q = kIt = 1,118 \times 1 \times 3600 \times 3 = 12074,4 \text{ мг} \approx 12 \text{ г.}$$

Объем всего слоя серебра определяем, разделив вес серебра, выделившегося на ложках, на его удельный вес:

$$12 : 10,5 = 1,14 \text{ см}^3.$$

Толщина слоя серебра получится, если этот объем разделить на полную поверхность двух ложек:

$$1,14 : 200 = 0,0057 \text{ см} = 0,057 \text{ мм.}$$

§ 12. ЭЛЕКТРОДВИЖУЩАЯ СИЛА И НАПРЯЖЕНИЕ

Электрический ток может появиться в проводнике только в том случае, если на одном конце проводника имеется избыток электронов, а на другом — их недостаток. Очевидно, такое положение не может возникнуть само по себе. Для того чтобы в проводнике появилась определенная разность в распределении электронов и чтобы эта разность все время поддерживалась на определенном уровне, необходимо, чтобы на концах проводника действовала электрическая сила, заставляющая электроны двигаться все время в одном направлении.

Электрический ток и поддержание его прохождения в электрической цепи на протяжении определенного времени вызывается *электродвижущей силой источника электрической энергии*.

В электротехнике принято электродвижущую силу обозначать буквой *E*. Очень часто название «электродвижущая сила» сокращенно записывают тремя начальными буквами этих слов в таком виде: э. д. с.

Электрические устройства, которые создают электродвижущую силу и поддерживают ток в электрической цепи, называют *источниками электрической энергии*. В электротехнике применяют разнообразные источники тока: электрохимические, электромеханические и другие. Некоторые источники тока и их условные обозначения приведены на рис. 9. Источники тока являются совершенно необходимой частью действующей электрической цепи, так как только они могут создавать ту разность уровней электрического состояния цепи, которая заставляет элек-

троны перемещаться в одном направлении. Подобно тому, как вода может течь только с более высокого места на более низкое, в электрической цепи ток будет циркулировать лишь при наличии разности электрических уровней как во всей цепи, так и на отдельных ее участках.

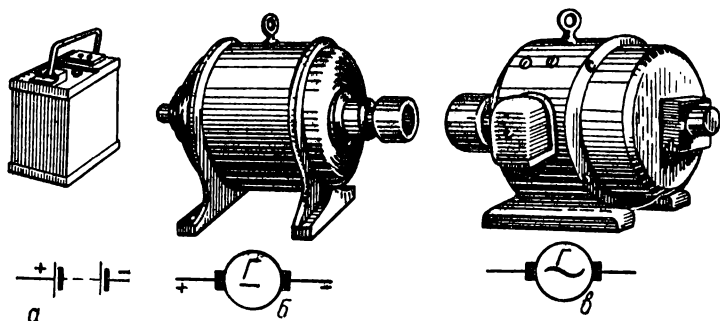


Рис. 9. Источники тока и их условные обозначения:
 а — аккумулятор; б — генератор постоянного тока; в — генератор переменного тока.

Эту разность электрических уровней называют *разностью электрических потенциалов*.

Если источник тока включен в электрическую цепь, то разность потенциалов на его зажимах, т. е. в том месте, где присоединяются к нему оба конца внешней электрической цепи, называют *напряжением*. Напряжение на зажимах источника тока нельзя смешивать с его электродвижущей силой, которую можно измерить на тех же зажимах только тогда, когда внешняя электрическая цепь разомкнута. В отличие от э. д. с. напряжение обозначают буквой U .

Э. д. с. может быть определена как полная разность потенциалов, которую получают на зажимах источника электрической энергии, когда он не включен в цепь. Напряжение на зажимах источника электрической энергии можно определить, если к нему подключена внешняя цепь, создающая какую-то электрическую нагрузку.

Если рассматривать не всю электрическую цепь, а только отдельный ее участок, ток в нем проходит благо-

даря наличию разности потенциалов на концах этого участка.

Таким образом, можно говорить не только о напряжении на зажимах источника тока, но и о напряжении на зажимах того или иного участка электрической цепи.

§ 13. СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКОВ

Электроны в процессе движения сталкиваются с атомами и при столкновении теряют часть своей энергии.

В различных металлических проводниках атомы размещены по-разному, поэтому электроны, перемещаясь между ними, встречают разные препятствия. Таким образом, проводники пропускают электрический ток с некоторым сопротивлением, которое называется *сопротивлением проводника*.

Но не только от материала проводника зависит его сопротивление. Оно также зависит от его размеров и температуры нагрева.

Сопротивление проводника, изготовленного из того или иного материала и имеющего длину один метр при площади поперечного сечения один квадратный миллиметр, называют его *удельным сопротивлением* и обозначают буквой ρ .

Если известны удельное сопротивление проводника ρ , его длина l и площадь поперечного сечения S , то полное сопротивление R можно определить по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Единицей измерения сопротивления проводника служит *ом*. Эту единицу измерения обозначают греческой буквой Ω (омега) или пишут по-русски — *ом*.

Один ом — это такое сопротивление, какое имеет ртутный столб высотой 106,3 см поперечным сечением, равным одному квадратному миллиметру, при температуре 0° .

Из приведенной формулы видно, что сопротивление проводника тем больше, чем больше его длина. Оно уменьшается, если проводник выбрать с большой площадью поперечного сечения. Сопротивление зависит от материала проводника и будет больше у проводника,

удельное сопротивление которого больше. Таким образом, сопротивление проводника прямо пропорционально его длине и удельному сопротивлению и обратно пропорционально площади его поперечного сечения.

Мы рассматривали сопротивление проводника как препятствие, которое создает проводник электрическому току.

Но все-таки ток по проводнику проходит. Следовательно, кроме сопротивления, проводник имеет также способность проводить электрический ток, то есть обладает *проводимостью*.

Чем больше сопротивление проводника, тем меньше его проводимость.

И, наоборот, чем меньше сопротивление он имеет, тем больший ток проходит по этому проводнику. Следовательно, такой проводник обладает большей проводимостью.

Поэтому сопротивление и проводимость проводника являются обратными величинами.

Так как сопротивление обозначается буквой R , то проводимость определяется единицей, деленной на сопротивление R

$$G = \frac{1}{R}.$$

В соответствии с этим величина, обратная удельному сопротивлению, называется *удельной проводимостью*. В некоторых случаях расчеты электрических цепей удобнее выполнять, исходя из проводимостей ветвей, составляющих цепь.

Если температура проводника увеличивается, то скорость движения электронов внутри него возрастает, а значит и столкновение между ними будет чаще. Это свидетельствует о том, что сопротивление металлических проводников с повышением их нагрева увеличивается. Сопротивление жидких проводников, угля и некоторых сплавов при нагревании, наоборот, уменьшается.

Величина, показывающая, как изменяется сопротивление проводника при нагревании его на 1° , называется *температурным коэффициентом* данного материала и обозначается греческой буквой α .

Если нам известно сопротивление металлического проводника до нагревания R_1 , на сколько градусов

проводник нагрет и его температурный коэффициент, то сопротивление этого проводника R_2 после нагревания можно определить, пользуясь следующей формулой:

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)].$$

В этой формуле t_1 — температура проводника до нагревания и t_2 — температура его после нагревания.

Ниже приводится таблица, в которой даны значения удельного сопротивления и температурные коэффициенты некоторых материалов.

Таблица 1

Удельные сопротивления и температурные коэффициенты материалов

Наименование материала	Удельное сопротивление ρ	Температурный коэффициент α
Медь	0,0172	0,00393
Алюминий	0,0283	0,040
Сталь	0,13	0,00625
Свинец	0,222	0,00387
Никелин	0,42	0,0002

Пример 4. Длина медной проволоки $l = 0,2$ км, диаметр $d = 2$ мм. Необходимо определить сопротивление этой проволоки.

Решение. Сопротивление определяем по формуле

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Площадь поперечного сечения проволоки

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 2^2}{4} = 3,14 \text{ мм}^2.$$

Удельное сопротивление меди $\rho = 0,0172$.

Подставив числа вместо букв в формулу для определения сопротивления R , получим

$$R = 0,0172 \times \frac{200}{3,14} = 1,11 \text{ ом}.$$

Пример 5. Для изготовления реостата с сопротивлением 100 ом взяли никелиновую проволоку (удельное сопротивление $\rho = 0,42$) диаметром 0,5 мм. Какой должна быть длина проволоки для реостата?

Решение.

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} = 0,196 \text{ мм}^2.$$

Длину проволоки определим из формулы $R = \rho \frac{l}{S}$,

откуда

$$l = \frac{RS}{\rho} = \frac{100 \times 0,2}{0,42} = 47,6 \text{ м.}$$

Пример 6. Сопротивление 1 км стального провода диаметром 4 мм при температуре 15° равно 10 ом. Найти сопротивление этого провода при температуре 0°.

Решение. Новое сопротивление найдем по формуле

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)].$$

Температурный коэффициент стали $\alpha = 0,00625$,

$$R_1 = 10 \text{ ом}, t_2 = 0^\circ, t_1 = 15^\circ.$$

Подставим эти значения в формулу и найдем

$$R_2 = 10 [1 + 0,00625 (0 - 15)] = 9 \text{ ом.}$$

Пример 7. Перед включением электромашин сопротивление ее обмоток возбуждения при температуре окружающего воздуха 20° было равно 100 ом. В процессе работы машины это сопротивление стало 120 ом. Определить, до какой температуры нагрелись обмотки

Решение.

$$R_1 = 100 \text{ ом}, R_2 = 120 \text{ ом}, t_1 = 20^\circ.$$

Температурный коэффициент α для медной проволоки равен 0,004. Подставим эти значения в формулу

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha (t_2 - t_1)]; \quad 120 = 100 [1 + 0,004 (t_2 - 20^\circ)],$$

откуда температура, до которой нагрелись обмотки возбуждения электромашин,

$$t_2 = \frac{28}{0,4} = 70^\circ.$$

§ 14. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ Э. Д. С. И НАПРЯЖЕНИЯ

Для измерения величины электродвижущей силы, а также напряжения и разности потенциалов в электро-технике принято пользоваться единицей, которая называется *вольт*. Эту единицу обозначают буквой *в*.

Один вольт — это такая э. д. с. или напряжение, при котором в цепи с сопротивлением один ом устанавливается ток силой один а.

Большие величины э. д. с. и напряжения измеряют единицей, которая в тысячу раз больше вольта, и называют ее *киловольт (кв)*. Очень малые э. д. с. и напряжения принято измерять в *милливольтах (мв)*, то есть в тысячных долях вольта, или в *микровольтах (мкв)*, составляющих миллионную часть вольта.

§ 15. ЗАКОН ДЖОУЛЯ — ЛЕНЦА

Преодолевая сопротивление проводника, электрический ток выполняет работу, в процессе которой в проводнике выделяется тепло. Свободные электроны при своем движении сталкиваются с атомами и молекулами, и при этих столкновениях механическая энергия движущихся электронов превращается в тепловую.

Зависимость тепловой энергии от силы тока в проводнике определяется по закону Джоуля—Ленца.

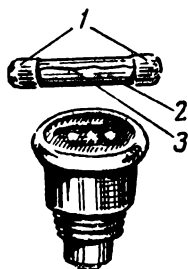


Рис. 10. Предохранители:

1—контактные колпачки; 2—стеклянная трубка; 3 — тонкая проволочка.

При прохождении электрического тока по проводнику количество тепла, выделяемого током в проводнике, прямо пропорционально силе тока, взятой во второй степени, величине сопротивления проводника и времени действия тока.

Если количество тепла обозначить буквой Q , силу тока в a — I , сопротивление в $ом$ — R и время в $сек$ — t , то математически этот закон можно представить так:

$$Q = 0,24 I^2 R t.$$

При этом количество тепла Q получится в *малых калориях* *. Коэффициент 0,24 в формуле фигурирует потому, что ток силой 1 a в проводнике с сопротивлением 1 $ом$ за 1 $сек$ выделяет 0,24 малых калорий тепла.

Малая калория служит единицей для измерения количества тепла.

Итак, тепло всегда выделяется в проводнике, когда в нем проходит ток. Однако чрезмерный нагрев проводников и электротехнических устройств допускать нельзя, так как это приведет к их повреждению. Особенно опасен перегрев при *коротком замыкании проводов*, то есть при электрическом соединении проводников, подводящих электрическую энергию к потребителю. При коротком замыкании сопротивление остающихся под током проводников ничтожно, ток из-за этого достигает большой

* По ГОСТ 9867—61 единица теплоты — джоуль (дж) : 1 дж = = 0,239 кал.

величины, и тепло выделяется в таком количестве, которое вызывает аварию.

Для предохранения от коротких замыканий и чрезмерных перегревов в цепь включаются *легкоплавящиеся предохранители*. Они представляют собой небольшие куски тонкой проволоки или пластинки, которые перегорают как только ток достигает определенной величины (рис. 10). Выбор плавких предохранителей производится в зависимости от площади сечения проводов по табл. 2.

Таблица 2

Наибольшая допустимая величина тока при данном сечении провода и плавкие предохранители, которые надо устанавливать

Площадь поперечного сечения изолированных медных проводов, мм ²	Наибольший допустимый ток, а	Плавкие предохранители на ток, а
1	11	6
1,5	14	10
2,5	20	15
4	25	20
6	31	25
10	43	35
16	75	60
25	100	80

Пример 8. Через реостат с сопротивлением 10 ом проходит ток 5 а. Какое количество тепла выделится на реостате за 1 ч?

Решение. $Q = 0,24 I^2 R t = 0,24 \cdot 5^2 \cdot 10 \cdot 3600 = 2\,160\,000$ малых калорий (кал) или 2160 килокалорий (ккал).

§ 16. РАБОТА И МОЩНОСТЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электрическая энергия — это способность электрического тока выполнять работу.

Одно из наиболее распространенных и широко используемых явлений, связанных с прохождением тока в проводнике, — выделение тепла — происходит в процессе выполнения работы. Ток, как известно, может выполнять и другую работу: вращать двигатели кранов, станков, трамваев, троллейбусов и других машин. Однако следует помнить, что работа, совершаемая электричеством, связана с одной особенностью. Только движущиеся электрические заряды (то есть электрический ток) могут производить работу. Подобно тому, как неподвижно стоящая в

озере вода не может вращать колеса мельниц и турбин, покоящиеся электрические заряды не в состоянии заставить работать двигатели. Но если воду из озера направить с определенной высоты на лопасти колес, то они будут вращаться. Выполняемая водой работа будет зависеть как от количества падающей воды, так и от высоты ее падения.

Аналогично этому работа электрического тока зависит от количества электричества, проходящего через проводник, и от того, под каким напряжением находится этот проводник.

Работа электрического тока равна количеству электричества, умноженному на напряжение.

Если обозначить количество электричества буквой Q , напряжение — U , то получим следующее соотношение:

$$A = QU.$$

Здесь A — количество работы, выполняемой электрическим током. Мы уже знаем, что количество электричества равно силе тока, умноженной на время его прохождения в проводнике

$$Q = It.$$

Следовательно, работу тока можно определить также и по другой формуле:

$$A = UIt.$$

Если ток в этой формуле дан в амперах, напряжение в вольтах и время в секундах, то работа будет измеряться единицей, которая называется *джоуль (дж)*.

Работу, выполняемую током в одну секунду, называют *мощностью электрического тока*.

Мощность тока принято обозначать буквой P .

Мощность равна работе, выполненной током за единицу времени,

$$P = \frac{A}{t}.$$

Подставив в эту формулу значение $A = UIt$, получим

$$P = UI.$$

Электрическую мощность принято измерять в *ваттах*. Один ватт — это мощность, которую развивает ток силой 1 *а* при напряжении 1 *в*.

Для измерения больших мощностей пользуются единицами, превышающими ватт (*вт*) в 100 и 1000 раз. 100 *вт* равны одному гектоватту (*гвт*), 1000 — одному киловатту (*квт*).

Очень часто энергию электрического тока измеряют не в джоулях, а в единицах, получаемых из единиц мощности: ватт-секунда (*вт·сек*), гектоватт-час (*гвт·ч*), киловатт-час (*квт·ч*).

Пример 9. Электрическая лампочка горит в сети при напряжении 120 *в* и потребляет ток 0,5 *а*. Время горения лампочки 5 *ч* в день. Определить электрическую энергию, затрачиваемую лампочкой в течение месяца.

Решение. $A = UIt = 120 \cdot 0,5 \cdot 5 \cdot 30 = 9000 \text{ вт}\cdot\text{ч}$.

Таким образом, за месяц лампочка потребляет 9 *квт·ч* электроэнергии.

Пример 10. Генератор постоянного тока развивает в сети напряжение 220 *в* при нагрузке 10 *а*. Определить ее мощность.

Решение. $P = 220 \times 10 = 2200 \text{ вт} = 2,2 \text{ квт}$.

ГЛАВА 3

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА

§ 17. ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Если два электрода из разных металлов погрузить в электролит, то между ними возникает разность потенциалов, и такое устройство может служить источником постоянного тока.

В устройствах подобного рода э. д. с. возникает благодаря тому, что между электродами и электролитом действует химическая реакция.

Источники постоянного тока, в которых химическая энергия превращается в электрическую, называются *гальваническими элементами*.

Гальванические элементы являются наиболее

простыми устройствами, с помощью которых можно получать электрический ток. Они имеют небольшие размеры и незначительный вес, благодаря чему ими особенно удобно пользоваться для питания переносных электротехнических устройств карманных фонарей, телефонных аппаратов, некоторых конструкций радиоприемников и других устройств. В силу особенностей своей конструкции гальванические элементы не могут обеспечить получение значительной мощности, и в этом заключается их недостаток. Кроме того, гальванические элементы приходят в негодность, когда химическая энергия их израсходуется. На практике применяются гальванические элементы разных типов.

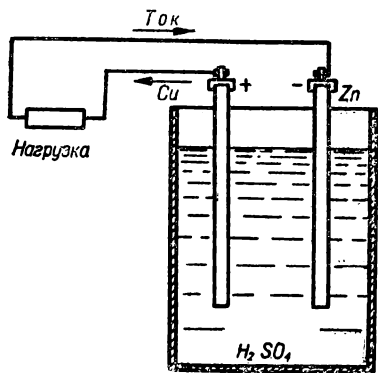


Рис. 11. Схема гальванического элемента.

Наиболее простой является следующая конструкция: в электролит, представляющий собой раствор серной кислоты (H_2SO_4), погружены медный (Cu) и цинковый (Zn) электроды. Медный электрод служит положительным полюсом, а цинковый — отрицательным. Э. д. с. такого элемента равна 1,1 в. Если электро-

ды элемента соединить, то цепь будет замкнута и в ней появится ток (рис. 11).

Внутри такого гальванического элемента происходит следующий процесс: молекула серной кислоты распадается на положительные и отрицательные ионы. Отрицательный ион (SO_4) вступает в химическую реакцию с цинковым электродом (Zn), в результате чего образуется сернокислый цинк ($ZnSO_4$). Эта реакция сопровождается появлением избыточного количества свободных электронов в цинковом электроде. Положительные ионы водорода (H) забирают у медного электрода электроны и превращаются в нейтральные атомы этого газа. Водород в виде пузырьков оседает на поверхности анода и образует как бы изолирующий слой. Это явление называют *поляризацией элемента*. Из-за поляризации внут-

ренное сопротивление элемента увеличивается и, кроме того, пузырьки водорода совместно с медным электродом образуют как бы дополнительный элемент, э. д. с. которого направлена против основной э. д. с. Поляризация ухудшает электрические качества элемента, поэтому для устранения ее применяют специальные вещества, которые могут легко выделять кислород. Кислород соединяется с водородом и образует воду. Водородные пузырьки, осевшие на электроде, исчезают, и электрические свойства гальванического элемента восстанавливаются.

Вещества, способные восстанавливать свойства гальванических элементов, называются *деполяризаторами*. В качестве деполяризатора часто применяется перекись марганца. Конструкция элемента, у которого деполяризатором является перекись марганца (MnO_2), а электролитом — раствор нашатыря, показана на рис. 12. Э. д. с. такого элемента равна 1,45—1,5 в; внутреннее сопротивление в зависимости от его размеров может быть в пределах от 0,3 до 3 ом. Элементы марганцевой системы бывают сухие, водоналивные и с воздушно-марганцевой деполяризацией.

Чем больше размеры элемента, тем больше его емкость.

Э. д. с. элемента зависит только от материала электродов и химического состава электролита и не связана с размерами самого элемента.

Продолжительность работы элемента зависит от его размеров, т. е. от количества электролита и величины электродов.

Количество электричества, отдаваемое элементом при разряде нормальным током до определенного конечного напряжения, называется его *емкостью*. Емкость элемента измеряется в *ампер-часах*. Один ампер-час равен 3600 кулонам.

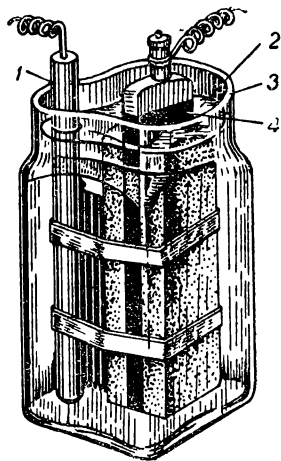


Рис. 12. Гальванический элемент с марганцевой деполяризацией:

1—цинк; 2—раствор нашатыря;
3—стеклянный сосуд; 4—уголь.

§ 18. СУХИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Устройство сухого элемента показано на рис. 13. Положительный полюс элемента представляет собой проводник,

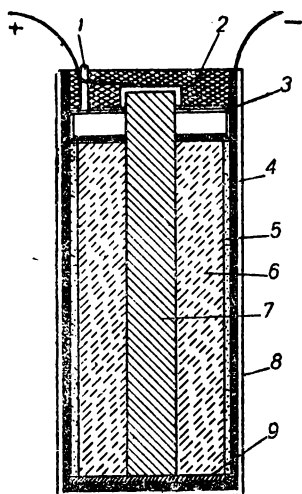


Рис. 13. Сухой элемент:

1 — газовыводная трубка; 2 — смоляная заливка; 3 — картонная шайба; 4 — цинковая коробка; 5 — паста; 6 — деполяризатор; 7 — угольный электрод; 8 — картонный футляр; 9 — изоляция между углем и цинковой коробкой.

соединенный с угольным электродом. Все содержимое элемента помещено в цинковой коробке, которая одновременно является отрицательным электродом. От этой коробки идет второй проводник. Он является отрицательным полюсом. Деполяризатор сухого элемента пропитывается раствором нашатыря. Электролитом служит паста, заполняющая пространство между деполяризатором и коробкой. Эта паста представляет собой смесь пшеничной и картофельной муки и раствора нашатыря.

Электрохимические данные сухого элемента такой конструкции следующие: э. д. с. = 1,45—1,5 в; внутреннее сопротивление по мере разряда возрастает от 0,3 до 3 ом.

Сухие элементы не могут долго сохраняться вследствие того, что они подвержены саморазрядке. В электротехнике часто пользуются сухими батареями, которые состояются из нескольких сухих элементов.

§ 19. ВОДОНАЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Водоналивные элементы отличаются от сухих, главным образом, тем, что вместо пасты между цинковой коробкой и деполяризатором находятся древесные опилки, смешанные с нашатырем, или нашатырь бывает насыпан над деполяризатором (рис. 14).

Перед включением этих элементов в электрическую цепь их заливают водой, имеющей температуру 15—20°.

После заливки водой элемент должен постоять 5—6 ч; после этого он готов к включению. Э. д. с. водоналивного элемента такая же, как и сухого (1,45—1,5 в). Внутреннее сопротивление при разряде увеличивается от 0,2 до 3,5 ом.

Элементы этого типа могут долго сохраняться, если они не залиты водой и находятся в сухом помещении. При температуре -18° водоналивные элементы замерзают и перестают работать.

§ 20. ЭЛЕМЕНТЫ С ВОЗДУШНО-МАРГАНЦЕВОЙ ДЕПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

В элементах этой системы для деполяризации применяют двуокись марганца и кислород воздуха.

Емкость таких элементов больше, чем элементов с марганцевой деполяризацией.

Для обеспечения доступа воздуха элементы с воздушно-марганцевой деполяризацией (сокращенно ВМД)

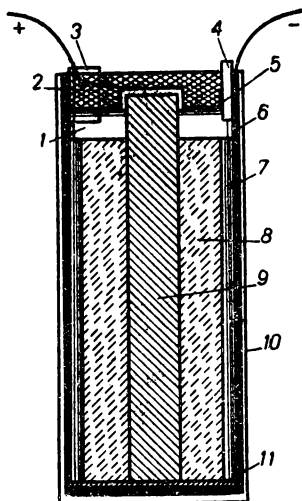


Рис. 14. Водоналивной элемент:

1 — нашатырь; 2 — смоляная заливка; 3 — водоналивная трубка; 4 — газотводная трубка; 5 — картонная шайба; 6 — цинковая коробка; 7 — фильтровальная бумага; 8 — деполяризатор; 9 — угольный электрод; 10 — картонный футляр; 11 — изоляция между углем и цинковой коробкой.

Таблица 3

Основные показатели сухих и водоналивных элементов

Условное обозначение	Э. д. с., в	Емкость, а.ч	Срок сохранности, месяцы		Э. д. с. в конце хранения, в	Емкость в конце хранения, а.ч
			заряженных	незаряженных		
1С-л-3	1,5	3,1	12	—	1,45	2,2
3С-л-30	1,5	30,0	18	—	1,45	24,0
1В-л-3	1,5	3,1	12	36	1,45	2,2
3В-л-27	1,5	27,0	12	36	1,45	22,0
3С-ВМД	1,4	60,0	12	—	—	48,0
6С-ВМД	1,4	150,0	19	—	1,40	110,0

имеют широкие стеклянные трубки, которые при работе элементов всегда открыты, а в нерабочем состоянии — закрыты, чтобы не высыхала паста. В эти элементы ни в коем случае нельзя наливать воду: мокрый уголь не будет поглощать кислород, и элемент испортится.

§ 21. АККУМУЛЯТОРЫ

Аккумулятором электрической энергии называют прибор, который может сохранять электрическую энергию, накапливаемую при пропускании через него электрического тока от постороннего источника э. д. с.

Эту энергию аккумулятор может отдавать во внешнюю электрическую цепь по мере надобности. При пропускании тока через аккумулятор в нем происходит химическое изменение вещества и его составных частей. Если после этого аккумулятор включить для работы в электрическую цепь, происходит обратная химическая реакция и вещество его составных частей переходит в первоначальное состояние. При этом выделяется энергия в виде электрического тока.

Первоначальный процесс пропускания через аккумулятор тока от внешнего источника называется *зарядом аккумулятора*. Процесс получения электрического тока от аккумулятора называют его *разрядом*.

Количество электричества, которое отдает аккумулятор при его разряде, называют емкостью. Емкость аккумулятора можно определить, если умножить силу разрядного тока, измеряемую в амперах, на количество часов, в течение которых происходит разряд. Поэтому емкость аккумулятора измеряется в ампер-часах (*а·ч*).

Аккумуляторы могут сохранять электрическую энергию довольно долго, поэтому ими широко пользуются, особенно в тех случаях, когда источник электрической энергии должен перемещаться вместе с устройствами, которые он питает.

В электротехнике применяются аккумуляторы двух видов: **с в и н ц о в ы е** и **щ е л о ч н ы е**.

§ 22. СВИНЦОВЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ

Свинцовый аккумулятор состоит из электродов, изготовленных в виде свинцовых пластин, погружаемых в

сосуд с водным раствором серной кислоты (электролита). Положительные пластины (аноды) покрыты перекисью свинца и имеют темно-коричневый цвет. Отрицательные пластины (катоды) серого цвета и состоят из губчатого свинца. Внутри сосуда отрицательные и положительные пластины устанавливаются в таком порядке: отрицательная, затем положительная, затем снова отрицательная и так далее. Поэтому отрицательных пластин всегда на одну больше, чем положительных.

При разряде свинцовых аккумуляторов на обоих электродах образуется сернокислый свинец, а при заряде он снова переходит в перекись свинца на аноде и в губчатый свинец на катоде.

В процессе заряда аккумулятора ионы водорода (H) перемещаются по направлению тока, а ионы, образовавшиеся в результате разложения серной кислоты (SO), идут против направления тока.

К концу заряда аккумулятора плотность электролита увеличивается. Ее измеряют при помощи ареометра (рис. 15), который представляет собой стеклянную трубку с делениями. Эта трубка запаяна с обоих концов. На одном конце ее имеется расширение, заполненное ртутью.

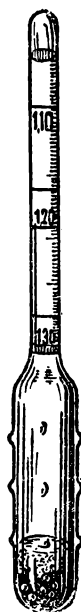


Рис. 15.
Ареометр.

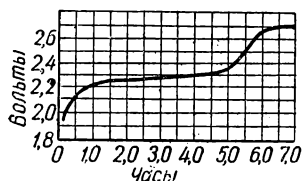


Рис. 16. Изменение напряжения свинцового аккумулятора при заряде.

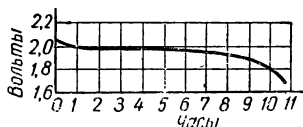


Рис. 17. Изменение напряжения свинцового аккумулятора при разряде.

Ареометр в электролите плавает вертикально и поднимается тем выше, чем больше его плотность. Деление на уровне жидкости показывает ее плотность.

При заряде свинцового аккумулятора его напряжение вначале быстро возрастает до 2—2,2 в, потом мед-

ленно поднимается до 2,3 в, а в конце заряда быстро возрастает до 2,6 в, после чего опять медленно увеличивается до 2,7—2,8 в. При напряжении 2,7 в аккумулятор начинает сильно «кипеть». Это показывает, что он уже заряжен. «Кипение» объясняется бурным выделением газов в конце заряда. Изменение напряжения свинцового аккумулятора в процессе заряда показано в виде кривой на рис. 16.

В процессе разряда аккумулятора напряжение его быстро падает до 2—1,95 в, затем медленно понижается до 1,8 в и в конце разряда быстро уменьшается до 1,7 в, затем до нуля. Кривая разряда свинцового аккумулятора показана на рис. 17.

§ 23. ЩЕЛОЧНЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ

В щелочных аккумуляторах пластины и сосуды изготовлены из железа. В качестве электролита применяется раствор едкого калия (KOH) в дистиллированной воде. В этих аккумуляторах электролитом может быть также раствор едкого натрия. И тот и другой растворы являются щелочью, поэтому аккумуляторы называются щелочными.

В щелочных аккумуляторах при заряде напряжение медленно поднимается от 1,4 до 1,5 в, затем резко повышается до 1,7 в и в конце заряда медленно возрастает до 1,8 в. При разряде напряжение быстро падает до 1,25 в, потом медленно — до 1,1 в.

Кривые заряда и разряда щелочных аккумуляторов изображены на рис. 18.

Щелочные аккумуляторы удобны при перевозке, так как они не боятся сотрясений. Они отличаются прочностью конструкции, не выделяют в процессе работы и при заряде вредных газов. Они не боятся перегрузки и могут долго оставаться в полуразряженном или разряженном состоянии.

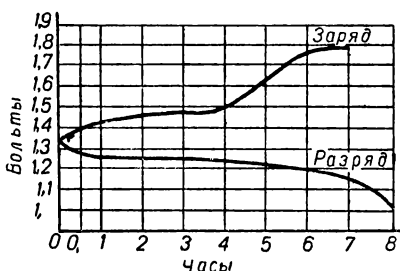


Рис. 18. Кривые заряда и разряда щелочных аккумуляторов.

По сравнению со свинцовыми (кислотными) аккумуляторами щелочные аккумуляторы имеют меньшее рабочее напряжение и меньший коэффициент полезного

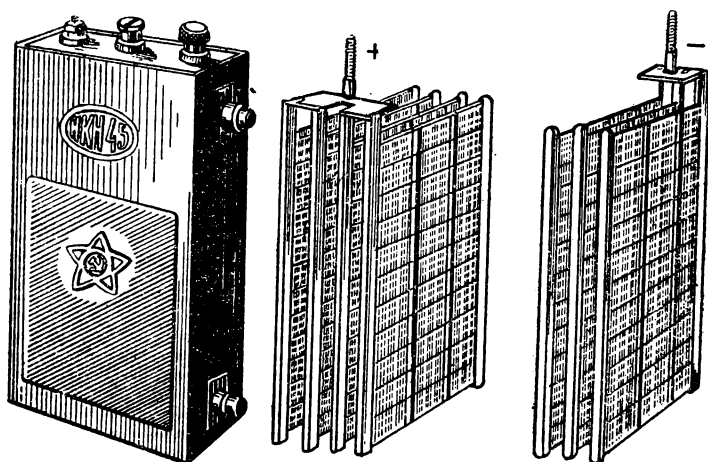


Рис. 19. Внешний вид щелочного аккумулятора и конструкция его положительных и отрицательных пластин.

действия. Внутреннее сопротивление щелочных аккумуляторов больше, чем кислотных.

Внешний вид щелочного аккумулятора и конструкция его положительных и отрицательных пластин показаны на рис. 19.

ГЛАВА 4

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 24. СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

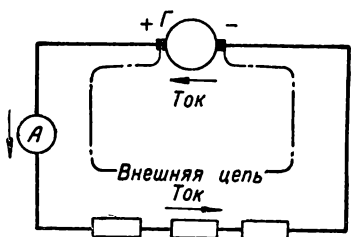
Соединенные между собой проводниками источники тока (гальванические элементы, аккумуляторы, генераторы) и устройства, потребляющие электрическую энергию, называют *электрической цепью*. Если электрическая цепь не имеет разрывов, то говорят, что такая цепь замкнута. Нам уже известно, что постоянный электрический ток может проходить только в замкнутой цепи.

Полное сопротивление замкнутой электрической цепи состоит из двух основных частей: из внутреннего сопротивления источника тока и внешнего сопротивления, которое состоит из сопротивления потребителя электрической энергии и сопротивления проводов, подводящих эту энергию от источника к потребителю (рис. 20).

Таким образом, если обозначить сопротивление цепи — R , внутреннее сопротивление — $R_{\text{внут}}$ и внешнее сопротивление — $R_{\text{внеш}}$, то общее сопротивление всей цепи

$$R = R_{\text{внут}} + R_{\text{внеш}}.$$

Что же касается электродвижущей силы источника тока, то часть ее идет на преодоление внутреннего сопротивления источника тока,



другая расходуется на преодоление сопротивления внешней цепи. Поэтому и э. д. с. может быть представлена в виде суммы двух слагаемых: напряжения внутри источника тока ($U_{\text{внут}}$) и напряжения во внешней цепи ($U_{\text{внеш}}$)

Рис. 20. Внешняя и внутренняя части электрической цепи.

$$E = U_{\text{внут}} + U_{\text{внеш}}.$$

Как известно, в замкнутой электрической цепи ток циркулирует всегда в одном и том же направлении, поэтому во внешней цепи он идет от плюса источника тока к минусу, внутри источника тока (например, в аккумуляторе) ток протекает от минуса к плюсу.

Из предыдущего соотношения, которое мы получили для определения э. д. с., следует, что напряжение на зажимах источника тока, то есть внешнее падение напряжения, можно получить, отняв от величины, определяющей э. д. с., величину внутреннего падения напряжения

$$U_{\text{внеш}} = E - U_{\text{внут}}.$$

§ 25. ЗАКОН ОМА

Сила тока, электродвижущая сила и сопротивление в замкнутой электрической цепи находятся между собой в определенной зависимости.

Для замкнутой электрической цепи эта зависимость имеет следующий вид:

$$I = \frac{E}{R_{\text{внут}} + R_{\text{внеш}}}.$$

Это математическое выражение закона Ома.

Закон Ома для замкнутой цепи электрического тока может быть изложен так:

Сила тока, протекающего в замкнутой цепи, равна электродвижущей силе источника тока, деленной на сопротивление всей цепи

Закон Ома — это один из основных законов электротехники. С его помощью можно производить расчеты электрических цепей, т. е. находить неизвестные величины, характеризующие электрические цепи, в зависимости от тех величин, которые заданы.

Если в формуле закона Ома вместо э. д. с. взять падение напряжения на каком-либо участке цепи и разделить на сопротивление этого участка, то определится сила тока, протекающего в этой части цепи.

Таким образом, закон Ома сохраняет свою силу не только для всей цепи, но и для отдельных ее участков. Это положение может быть выражено следующим образом.

В данном участке цепи сила тока равна напряжению на концах этого участка, разделенному на его сопротивление

$$I = \frac{U}{R}.$$

Из закона Ома для полной электрической цепи следует, что электродвижущая сила равна произведению силы тока на полное сопротивление всей цепи

$$E = IR.$$

Величина сопротивления всей цепи равна э. д. с., деленной на силу тока,

$$R = \frac{E}{I}.$$

Из приводимых выше соотношений может создаться такое впечатление, что э. д. с. зависит от сопротивления.

Казалось бы, что если увеличить в два раза сопротивление, то и э. д. с. увеличится в два раза. Однако это не так, э. д. с. не зависит ни от силы тока, ни от сопротивления. Поэтому с увеличением сопротивления сила тока уменьшится во столько раз, во сколько увеличилось сопротивление.

Аналогичное положение необходимо также отметить в отношении полного сопротивления цепи. Оно зависит исключительно от сечения проводников, схемы их включения, длины отдельных участков цепи и от материала, из которого изготовлены проводники. Увеличение или уменьшение э. д. с. повлечет за собой изменение силы тока, но сопротивление цепи останется прежним.

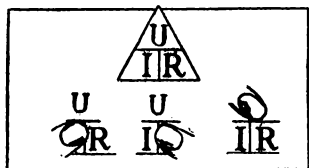


Рис. 21. Закон Ома. Треугольник, помогающий запомнить соотношения, вытекающие из закона Ома.

Пользуясь законом Ома, для участка цепи можно получить такое соотношение:

$$U = IR,$$

т. е. напряжение на участке цепи равно произведению силы тока на сопротивление этого участка.

Сопротивление участка цепи можно определить, поделив падение напряжения на этом участке на величину тока в той же части цепи

$$R = \frac{U}{I}.$$

Все соотношения, которые можно получить из закона Ома, легко составить, пользуясь треугольником, изображенным на рис. 21. В этом треугольнике надо закрыть пальцем ту величину, которую необходимо определить. Тогда взаимное расположение двух других величин покажет, как надо поступать, чтобы найти то, что нас интересует.

В формуле закона Ома величину сопротивления можно заменить проводимостью. Вполне понятно, что математические соотношения будут иметь в этом случае несколько иной вид. Так, например: сила тока будет равна произведению величины проводимости цепи на напряжение

$$I = GU.$$

Из этой формулы можно легко получить другие соотношения, необходимые для определения той или иной величины.

Пример 11. Полное сопротивление цепи равно 20 ом. Э. д. с. источника тока равна 30 в. Найти силу тока, проходящего в цепи.

Решение. $I = \frac{E}{R} = 30 : 20 = 1,5 \text{ а.}$

Пример 12. Чему равна электродвижущая сила батареи, если ток в цепи равен 2 а, сопротивление всей цепи равно 25 ом?

Решение. $E = 2 \times 25 = 50 \text{ в.}$

Пример 13. Напряжение на зажимах реостата 200 в, ток, который проходит через реостат, 4 а. Найти сопротивление реостата.

Решение. $R = \frac{U}{I} = \frac{200}{4} = 50 \text{ ом.}$

§ 26. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Электрическая цепь может быть составлена так, что начало одного сопротивления соединяется с концом другого, ток при этом проходит последовательно одно за другим все сопротивления. Такое соединение называется *последовательным*.

Общее сопротивление цепи, состоящей из нескольких последовательно соединенных сопротивлений, равно сумме этих сопротивлений. Цепь, составленная из последовательно включенных сопротивлений, показана на рис. 22. Сопротивление этой цепи

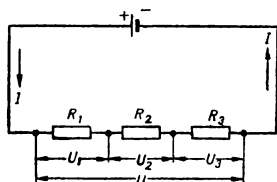


Рис. 22. Последовательное соединение сопротивлений.

$$R = R_1 + R_2 + R_3.$$

Совершенно очевидно, что сила тока в такой цепи будет одна и та же во всех ее частях. Напряжение на зажимах цепи равняется сумме напряжений на отдельных ее участках

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Пример 14. Цепь состоит из четырех последовательно включенных сопротивлений: $R_1 = 10 \text{ ом}$, $R_2 = 5 \text{ ом}$, $R_3 = 8 \text{ ом}$ и $R_4 = 12 \text{ ом}$. Сила тока в цепи 2 а. Найти напряжение на концах всей цепи.

Решение. Полное сопротивление цепи

$$R = 10 + 5 + 8 + 12 = 35 \text{ ом.}$$

Напряжение на концах цепи

$$U = 35 \times 2 = 70 \text{ в.}$$

Пример 15. Чему равна электродвижущая сила батареи, если сила тока в цепи 3 а, внешняя цепь состоит из трех последовательно включенных сопротивлений 2, 3 и 5 ом и внутреннее сопротивление батареи 1 ом?

Решение. Падение напряжения на отдельных участках цепи

$$U_1 = IR_1 = 3 \times 2 = 6 \text{ в;}$$

$$U_2 = IR_2 = 3 \times 3 = 9 \text{ в;}$$

$$U_3 = IR_3 = 3 \times 5 = 15 \text{ в.}$$

Падение напряжения во внешней цепи

$$U_{\text{внеш}} = U_1 + U_2 + U_3 = 6 + 9 + 15 = 30 \text{ в.}$$

Падение напряжения внутри источника тока

$$U_{\text{внутр}} = IR_{\text{внутр}} = 3 \times 1 = 3 \text{ в,}$$

откуда э. д. с. батареи

$$U = U_{\text{внеш}} + U_{\text{внутр}} = 30 + 3 = 33 \text{ в.}$$

§ 27. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Параллельным соединением сопротивлений называется такое соединение, при котором с одной стороны соединяются все начала сопротивлений, а с другой — все их концы (рис. 23).

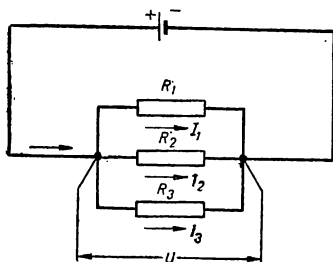


Рис. 23. Параллельное соединение сопротивлений.

При таком соединении ток разветвляется, проходя одновременно по нескольким сопротивлениям. Все сопротивления параллельной цепи находятся под одинаковым напряжением, поэтому

$$U = U_1 = U_2 = U_3;$$

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

Общее сопротивление параллельной цепи меньше сопротивления любой из составляющих ее ветвей.

Что касается проводимости параллельной цепи, то она равна сумме проводимостей отдельных ветвей, со-

ставляющих ее. Таким образом, проводимость цепи, изображенной на рис. 23,

$$G = G_1 + G_2 + G_3$$

или

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_1 R_2 R_3}.$$

Чтобы получить сопротивление такой цепи, надо перевернуть дробь, определяющую величину ее проводимости. Следовательно, сопротивление параллельного разветвления

$$R = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}.$$

Пример 16. Чему равно сопротивление разветвленной цепи, состоящей из трех ветвей? Сопротивления этих ветвей следующие: 2, 3 и 9 ом.

Решение. Проводимость этого параллельного разветвления

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{9} = \frac{17}{18}.$$

Чтобы получить величину сопротивления, надо единицу разделить на полученную величину проводимости:

$$1 : \frac{17}{18} \approx \frac{18}{17} = 1 \text{ ом}.$$

Нетрудно убедиться путем простейших подсчетов, что сопротивление параллельной цепи, состоящей из двух одинаковых ветвей, равно половине сопротивления каждой из этих ветвей. Если параллельная цепь состоит из трех одинаковых ветвей, то ее сопротивление равно третьей части сопротивления каждой ветви. В первом случае сопротивление цепи можно определить по формуле

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

Пример 17. Определить сопротивление цепи, состоящей из двух ветвей. Сопротивление одной ветви 4, а другой — 6 ом.

Решение. Пользуясь предыдущей формулой, находим величину сопротивления:

$$R = \frac{4 \cdot 6}{4 + 6} = 2,4 \text{ ом}.$$

Пример 18. Параллельная цепь состоит из пяти ветвей, сопротивления которых равны между собой. Чему равно сопротивление всей цепи, если сопротивление одной ветви 10 ом.

Решение.

$$R = \frac{10}{5} = 2 \text{ ом}.$$

§ 28. СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Смешанным соединением называют такое соединение, при котором в цепи имеются сопротивления, включенные последовательно и параллельно (рис. 24).

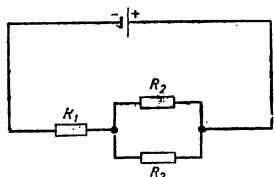


Рис. 24. Смешанное соединение сопротивлений.

При смешанном соединении сопротивлений общая величина сопротивления цепи определяется на основании тех правил, которые были изложены для последовательных и параллельных включений.

Таким образом, чтобы определить общее сопротивление нескольких элементов цепи, соединенных смешанно, необходимо найти сначала сопротивления тех частей цепи, которые соединены параллельно. Затем полученные сопротивления отдельных участков цепи надо сложить. Результат даст нам величину сопротивления всей смешанной цепи.

Пример 19. Чему равно сопротивление смешанной цепи, схема которой дана на рис. 24?

Сопротивления составляющих ее ветвей следующие:

$$R_1 = 8 \text{ ом}, \quad R_2 = 6 \text{ ом}, \quad R_3 = 3 \text{ ом}.$$

Решение. Сначала надо найти сопротивление параллельной части цепи

$$R_{2,3} = \frac{6 \cdot 3}{6 + 3} = 2 \text{ ом}.$$

Рассматривая теперь всю цепь как последовательное включение двух сопротивлений, из которых одно равно 8 ом, а второе 2 ом, получим полное сопротивление смешанной цепи

$$R = 8 + 2 = 10 \text{ ом}.$$

§ 29. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

Источники тока подобно сопротивлениям могут быть включены последовательно и параллельно.

При последовательном соединении источников тока общая электродвижущая сила равна сумме электродви-

жущих сил всех источников тока, входящих в соединение. Последовательное соединение источников тока применяется тогда, когда необходимо получить значительное напряжение в цепи.

При параллельном соединении источников тока электродвижущая сила остается такой же, как у каждого отдельного источника тока, входящего в схему. Параллельное соединение применяют тогда, когда требуется значительная сила тока.

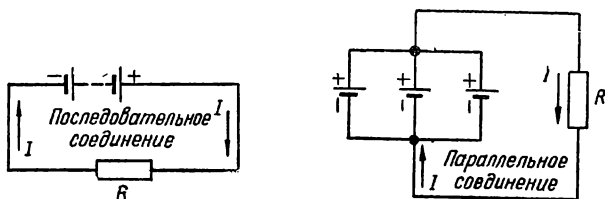


Рис. 25. Последовательное и параллельное соединение источников тока.

Параллельно соединять можно только те источники тока, которые имеют одинаковую э. д. с. и одинаковое внутреннее сопротивление.

Если э. д. с. и внутренние сопротивления источников тока разные, то при параллельном соединении их одни источники тока будут разряжаться через другие.

Таблица 4

Номинальные данные сухих анодных батарей

Условное обозначение батарей	Начальные данные			Гарантируемый срок сохранности	Емкость при +20° (не менее)
	э. д. с. (не менее)	средняя емкость при +20° (не менее)	средняя емкость при -40° (не менее)		
	в	а.ч	а.ч	месяцы	а.ч
БАС-80-у-1	104	1,05	0,21	15	0,7
БАС-80-х-1	104	1,05	0,21	15	0,7
БАС-80-л-0,9	94	0,85	—	10	0,65
БАС-Г-80-л-2,1	104	2,1	—	12	1,55
БАС-60-у-0,5	70	0,5	0,1	10	0,3
БАС-70-х-0,5	70	0,5	0,1	10	0,3
БАС-60-л-0,4	62	0,42	—	9	0,28
БАС-Г-60-л-1,3	74	1,30	—	12	0,95

Последовательное и параллельное соединения источников тока показаны на рис. 25.

Источники тока можно соединять также, применяя смешанное включение. При этом группа источников тока будет частично включена параллельно и частично последовательно.

Группа элементов, соединенных последовательно, параллельно или смешанно, называется батареей. В табл. 4 приведены данные некоторых сухих батарей.

§ 30. ПЕРВЫЙ ЗАКОН КИРХГОФА

В разветвленной электрической цепи сила тока, протекающего к месту соединения нескольких сопротивлений, равна сумме сил токов, уходящих из него.

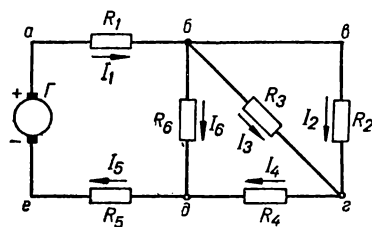


Рис. 26. Сложная электрическая цепь.

Так, например, на рис. 26, где изображена сложная электрическая цепь, а направление токов показано стрелками, в узловом соединении, обозначенном буквой б, ток I_1 подходит к узлу, токи I_2 , I_3 и I_6 выходят из него. Поэтому на основании

первого закона Кирхгофа можно написать следующее равенство:

$$I_1 = I_2 + I_3 + I_6.$$

Для узлового соединения, обозначенного буквой а, получится такое уравнение:

$$I_4 = I_2 + I_3.$$

Пример 20. Определить суммарный ток, протекающий в неразветвленной части параллельного соединения, если в параллельных ветвях проходят токи 2, 3 и 5 а.

Решение. $I = 2 + 3 + 5 = 10$ а.

§ 31. ВТОРОЙ ЗАКОН КИРХГОФА

Во всякой электрической цепи суммарная электродвижущая сила равна сумме падений напряжений на отдельных участках этой цепи.

Пользуясь при расчете электрических цепей вторым законом Кирхгофа, следует не забывать, что здесь речь идет об алгебраической сумме. Поэтому отдельные слагаемые могут иметь отрицательную величину.

Применение второго закона Кирхгофа лучше всего показать на примере расчета какой-либо электрической цепи. Для этого рассмотрим расчет цепи, изображенной на рис. 27.

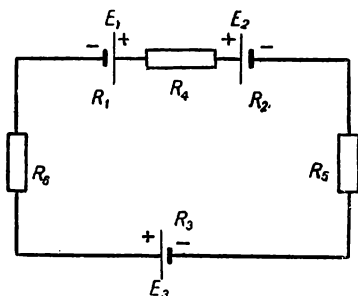


Рис. 27. Схема электрической цепи к расчету по второму закону Кирхгофа.

Пример 21. Замкнутая электрическая цепь состоит из трех источников э. д. с., имеющих следующие данные:

$$E_1 = 1,5 \text{ в}, \quad R_1 = 5 \text{ ом},$$

$$E_2 = 1,0 \text{ в}, \quad R_2 = 8 \text{ ом},$$

$$E_3 = 0,8 \text{ в}, \quad R_3 = 8 \text{ ом}.$$

Кроме этого, в цепь включены сопротивления:

$$R_4 = 5 \text{ ом}, \quad R_5 = 10 \text{ ом} \text{ и } R_6 = 15 \text{ ом}.$$

Необходимо узнать силу тока, который циркулирует в цепи. Решение. При наличии в цепи только первого источника тока последний имел бы направление по часовой стрелке. Второй источник тока, действуя самостоятельно, вызвал бы ток против часовой стрелки, то есть в направлении, противоположном току первого источника тока. Третья э. д. с., если бы она была одна, вызвала бы ток такого же направления, как и первая. Поэтому алгебраическая сумма э. д. с. в рассматриваемой цепи

$$E = E_1 + E_2 + E_3 = (+1,5) + (-1) + (+0,8) = 1,3 \text{ в}.$$

Согласно второму закону Кирхгофа можно составить следующее уравнение:

$$1,3 = 5I + 8I + 5I + 10I + 15I + 8I = 51I.$$

Сила тока

$$I = \frac{1,3}{51} = 0,025\text{а} = 25 \text{ ма}.$$

Пример 22. В цепь включен генератор и навстречу ему батарея аккумуляторов. Кроме этого, в цепь включены сопротивления:

$$R_1 = 10 \text{ ом}, \quad R_2 = 3 \text{ ом} \text{ и } R_3 = 7 \text{ ом}.$$

Сила тока 5 а. Напряжение аккумуляторной батареи 20 в.
Определить электродвижущую силу генератора.

Р е ш е н и е. Падение напряжения в цепи

$$I(R_1 + R_2 + R_3) = 5(10 + 3 + 7) = 100 \text{ в.}$$

Так как ток аккумуляторов направлен против тока генератора, то в алгебраической сумме их э. д. с. надо из одной величины вычесть другую: $E - 20 = 100$ в, откуда э. д. с. генератора $E = 100 + 20 = 120$ в.



ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

§ 32. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ И ЕГО СВОЙСТВА

Если в каком-либо пространстве находятся электрические заряды, то они действуют один на другого. Нам уже известно, что электрические заряды, имеющие одинаковый знак, отталкиваются. Заряды противоположных знаков притягиваются.

Пространство, в котором находится тело, имеющее электрический заряд, и в котором проявляют себя электрические силы, связанные с этим зарядом, называют электрическим полем.

Если два заряда притягиваются или отталкиваются, то это значит, что между ними действуют электрические силы. Направление действия электрических сил в той или иной части электрического поля представляют в виде силовых линий. Таким образом, силовая линия — это линия, которая во всех своих точках совпадает с направлением действия электрических сил поля. Каждую силовую линию поля можно представить себе как путь, по которому под действием электрических сил перемещался бы элементарный положительный заряд электричества.

Таким образом, электрическое поле можно изобразить в виде множества силовых линий, определяющих его направление в разных точках пространства. Не следует, однако, забывать, что электрическое поле принято представлять в виде пучка силовых линий только для того, чтобы упростить исследование электрического поля в разных точках пространства и более наглядно представить себе его особенности.

Если одно из тел имеет положительный заряд, а другое — отрицательный, то полагают, что силовые линии, определяющие направления взаимодействия этих

зарядов, начинаются у положительного заряда и кончаются у отрицательного. Электрическое поле двух таких зарядов показано на рис. 28. Для двух зарядов, имеющих одинаковые знаки, расположение силовых линий поля будет таким, как это показано на рис. 29. Силовые линии всегда перпендикулярны к поверхности

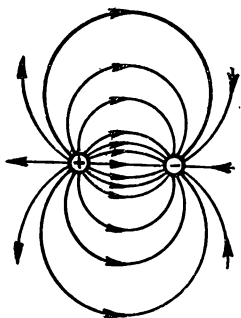


Рис. 28. Силовые линии поля разноименных зарядов.

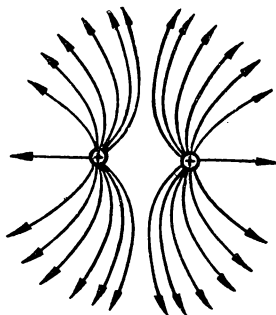


Рис. 29. Силовые линии поля одноименных зарядов.

электрически заряженного тела. Направление силовых линий, характеризующих электрическое поле шарообразного тела, заряженного положительно или отрицательно, показано на рис. 30.

Если в электрическом поле перемещается положительный электрический заряд, то при этом электрические силы совершают какую-то работу.

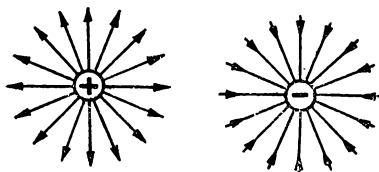


Рис. 30. Направление силовых линий поля положительного и отрицательного заряда.

Та работа, которую выполняют электрические силы при перемещении электрического заряда, равного единице, из данной точки поля в бесконечность, позволяет

судить об электрическом уровне этой точки поля или, как говорят, о ее электрическом потенциале. Разность потенциалов между двумя точками поля называется *напряжением*. Напряже-

ние между двумя точками определяется той работой, которую необходимо выполнить, перемещая единицу электрического заряда из одной точки в другую. Если потенциал двух точек поля одинаковый, то электрический заряд перемещаться между ними не будет. Только наличие разности потенциалов может заставить электрический заряд перемещаться в электрическом поле. При этом положительный заряд будет продвигаться от той точки, в которой имеется более высокий потенциал, к точке с более низким потенциалом.

Условились считать потенциал земли, а следовательно, и точек электрической цепи, которые соединены с землей, равным нулю. Потенциал какой-либо точки будет положительным или отрицательным в зависимости от того, больше он или меньше нулевого.

§ 33. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЕМКОСТЬ

Если какое-либо тело зарядить электричеством и затем добавлять электрический заряд, то с увеличением количества электричества в данном теле будет повышаться и его электрический потенциал. Два разных по величине шара одним и тем же количеством электричества можно зарядить до разных потенциалов. Чтобы потенциалы таких шаров были одинаковы, надо меньшему шару сообщить меньшее количество электричества, а большему — большее. Это явление подобно наполнению двух разных сосудов жидкостью. Чтобы жидкость в таких сосудах была на одинаковом уровне, необходимо в них влить разные количества ее (в больший — больше, а в меньший — меньше).

Подобно тому, как вместимость сосудов определяют их емкостью, способность тел заключать в себе электрические заряды разной величины определяют электрической емкостью. Таким образом, *электрическая емкость — это способность тела накапливать электрические заряды при повышении его потенциала до определенного уровня.*

Если известно напряжение, до которого заряжено тело, и величина электрического заряда, то емкость можно определить из следующего соотношения:

$$C = \frac{Q}{U}.$$

Здесь Q — электрический заряд тела в кулонах, U — напряжение в вольтах. При этом электрическая

емкость C получается в единицах, называемых *фарадами* (ϕ).

Фарада — это электрическая емкость тела, заряд которого увеличивается на один кулон при повышении его потенциала на один вольт.

Электрическая емкость, равная одной фараде, — это очень большая величина; чтобы представить ее, достаточно сказать, что емкость земного шара меньше, чем одна тысячная доля фарады. Поэтому в практике электрическую емкость измеряют единицами, составляющими одну миллионную часть фарады. Такую единицу называют *микрофарадой*, или сокращенно *мкф*.

Пример 23. Чему равна емкость тела, если заряд его равен 0,001 к, а напряжение 100 в?

Решение. Емкость можно определить по формуле

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{0,001}{100} = 0,00001 \phi = 10 \text{ мкф.}$$

§ 34. КОНДЕНСАТОРЫ

В электротехнике для обеспечения необходимых емкостей пользуются специальными устройствами — конденсаторами. *Конденсатором* называется прибор, состоящий из двух металлических пластин, между которыми находится изолирующее вещество — *диэлектрик*. Пластины называют *обкладками конденсатора*. Если пластины конденсатора соединить с разноименными полюсами источника тока, то на них образуются разные по знаку электрические заряды, которые будут притягиваться один к другому.

Эти заряды могут оставаться на обкладках конденсатора продолжительное время даже после того, как источник тока будет отключен. Таким образом, конденсаторы являются накопителями электрической энергии.

Чем больше поверхность обкладок конденсатора, тем больше его емкость. Емкость конденсатора увеличивается также с уменьшением толщины диэлектрика. Толщина его может быть больше или меньше в зависимости от того, какое изолирующее вещество находится между обкладками.

Влияние изолирующего вещества на емкость конденсатора характеризуется *диэлектрической проницаемостью* этого вещества. Диэлектрическая проницаемость воздуха считается равной единице. Если вместо воздуха между обкладками конденсатора находится другой диэлектрик, то его диэлектрическая проницаемость показывает, во сколько раз при этом увеличивается емкость конденсатора.

Диэлектрическую проницаемость принято обозначать греческой буквой ϵ (эпсилон). Диэлектрическая проницаемость некоторых наиболее часто применяемых изолирующих веществ приводится в табл. 5.

Диэлектрическая проницаемость многих веществ может изменяться в некоторых пределах в зависимости от влажности окружающего воздуха и его температуры.

Между электрическими зарядами, накопившимися на обкладке конденсатора, возникает электрическое поле. Это поле характеризуется величиной, которую называют *напряженностью*.

Если в электрическом поле находится заряженное электричеством тело, то *сила, с которой поле действует на это тело, пропорциональна величине электрического заряда тела и напряженности поля в точке нахождения тела*. Потому напряженность электрического поля можно представить как отношение силы, действующей на заряд, к величине этого заряда

$$E = \frac{F}{Q}.$$

Представим силу F как отношение работы, измеренной в джоулях, к длине пути, на котором действует эта сила. Тогда единица измерения напряженности электри-

Таблица 5

Диэлектрическая проницаемость изолирующих материалов

Наименование диэлектрика	Диэлектрическая проницаемость
Воздух	1
Парафин	2,1—2,2
Трансформаторное масло	2 —2,5
Прессшпан	2,5—4
Бумага	3 —3,5
Слюда	4 —7,5
Стекло	5,5—10
Мрамор	8,3
Резина	3,5

ческого поля может быть выражена через джоуль, кулон и метр в виде следующего отношения:

$$1E = \frac{\text{дж}}{\kappa \times \text{м}}.$$

Но один джоуль, деленный на один кулон,— это один вольт. Следовательно, напряженность электрического поля должна измеряться в единицах, образующихся от деления вольта на метр,

$$1E = \frac{\text{в}}{\text{м}}.$$

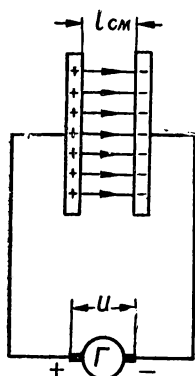


Рис. 31. Электрическое поле конденсатора.

Напряженность электрического поля конденсатора можно представить как отношение напряжения на обкладках к длине силовых линий (рис. 31). Если напряженность поля обозначить буквой E , расстояние между обкладками конденсатора буквой l (в см), то напряженность электрического поля в диэлектрике конденсатора

$$E = \frac{U}{l} \left[\frac{\text{в}}{\text{см}} \right].$$

Таким образом, с увеличением напряжения на обкладках конденсатора возрастает напряженность поля в его диэлектрике.

Увеличение напряженности электрического поля возможно только до определенных пределов. При возрастании ее выше определенной критической величины электрический заряд одной обкладки может перейти на другую через всю толщину изолирующего вещества. Это явление называется *пробоем конденсатора*.

§ 35. КОНСТРУКЦИИ КОНДЕНСАТОРОВ И ИХ СОЕДИНЕНИЯ

В конденсаторах разных конструкций применяются воздушные, твердые или жидкие диэлектрики. Конденсаторы с воздушным диэлектриком часто применяются в радиотехнике. Различают также конденсаторы *постоянной и переменной емкости*. Конструкция конденсатора переменной емкости показана на рис. 32. Конденсаторы постоянной емкости бывают с бумажной, слюдяной или

керамической изоляцией. Бумажные конденсаторы показаны на рис. 33. Их емкость бывает обычно в пределах от 0,01 до 10 мкф. В электрических цепях постоянного тока применяются также *электролитические конденсаторы*, т. е. конденсаторы с жидким диэлектриком (рис. 34). Емкость таких конденсаторов значительно изменяется при изменении температуры. Конденсаторы этого типа бывают: 1) высоковольтные — до 450 в, 2) низковольтные — до 50 в. Емкость высоковольтных электролитических конденсаторов может быть в пределах от 5 до 30 мкф. Низковольтные электролитические конденсаторы изготавливаются емкостью до 2000 мкф. Устройство низковольтных и высоковольтных электролитических конденсаторов одинаково.

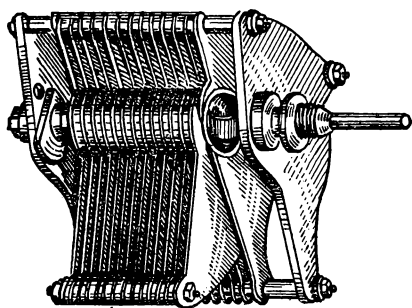


Рис. 32. Конденсатор переменной емкости.

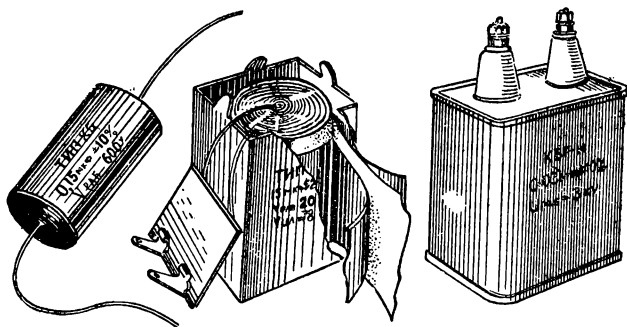


Рис. 33. Бумажные конденсаторы.

Электролитические конденсаторы надо включать с учетом полюсов источника тока. Их техническим преимуществом является значительная емкость. Электролитические конденсаторы могут иметь емкость в несколько тысяч микрофард.

Конденсаторы можно соединять как параллельно, так и последовательно.

При параллельном соединении нескольких конденсаторов их общая емкость будет равняться сумме емкостей отдельных конденсаторов. Параллельное соединение конденсаторов показано на рис. 35.

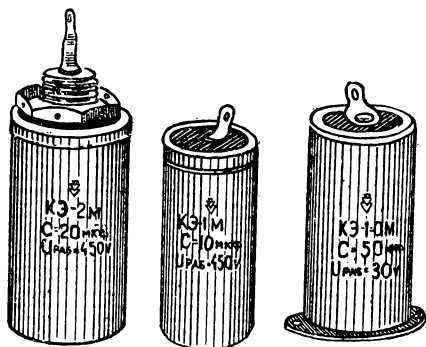


Рис. 34. Электролитические конденсаторы.

Общая емкость показанной на рисунке группы конденсаторов

$$C = C_1 + C_2.$$

Последовательное соединение конденсаторов изображено на рис. 36.

Общую емкость группы последовательно соединенных конденсаторов можно определить, складывая величины, обратные величинам их емкостей. Для определения общей

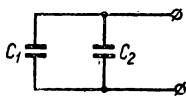


Рис. 35. Параллельное соединение конденсаторов.

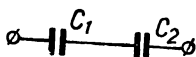


Рис. 36. Последовательное соединение конденсаторов.

емкости двух последовательно соединенных конденсаторов надо выполнить следующую математическую операцию

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

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

Если последовательно соединены 5 конденсаторов, имеющих одинаковую емкость C , то их общая емкость будет меньше емкости одного конденсатора в пять раз:

$$C_{\text{общ}} = \frac{C}{5}.$$

Пример 24. Чему равна общая емкость трех конденсаторов, если емкость каждого из них равняется:

$$C_1 = 2 \text{ мкф}, \quad C_2 = 5 \text{ мкф}, \quad C_3 = 10 \text{ мкф}.$$

Конденсаторы соединены последовательно.

Решение.

$$\frac{1}{C_{\text{общ}}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{5} + \frac{1}{10} = \frac{5 + 2 + 1}{10} = \frac{8}{10};$$

$$C_{\text{общ}} = \frac{10}{8} = 1,25 \text{ мкф}.$$

ГЛАВА 2

МАГНЕТИЗМ И ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

§ 36. МАГНИТЫ И МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Еще в глубокой древности была обнаружена железная руда, которая может притягивать железные предметы. Это свойство руды было названо *магнетизмом*. Впоследствии установили, что железная руда, имеющая магнитные свойства, является химическим соединением железа с кислородом. Ее химическая формула Fe_3O_4 . Такую руду называют *магнитным железняком*.

Изготовленные из магнитного железняка стержни различной формы сохраняют магнитные качества и называются *естественными магнитами*.

Если стержни из обыкновенного железа прижать к естественным магнитам, то они также приобретают магнитные качества, которые сохраняются продолжительное время. Обработанные таким способом железные стержни называют *искусственными магнитами*. Магниты различной формы изображены на рис. 37.

Каждый магнит независимо от его формы имеет два полюса. Если установить магнитную стрелку на острой игле так, чтобы между стрелкой и иглой было возможно меньшее трение, то стрелка самостоятельно повернется одним концом на север, а другим на юг. Конец ее, направленный на север, называется *северным полюсом* и обозначается буквой С или N. Другой конец, направленный на юг, называется *южным полюсом*.

и обозначается буквой Ю или S. Каждый магнит имеет северный и южный полюсы.

Если к магнитной стрелке приблизить постоянный магнит так, чтобы одноименные полюсы стрелки и магнита совпадали, стрелка повернется вокруг своей оси. Если же к стрелке приблизить магнит полюсом, противо-

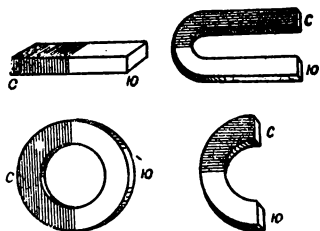


Рис. 37. Постоянные магниты разной формы.

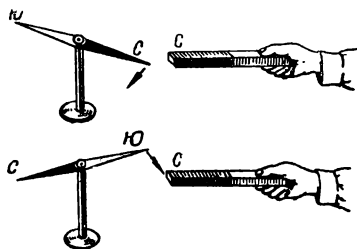


Рис. 38. Взаимодействие между магнитной стрелкой и постоянным магнитом.

положным той полярности, которую имеет данный конец стрелки, она, поворачиваясь, будет притягиваться этим концом к магниту (рис. 38).

Полюсы магнитов, имеющие одинаковую полярность, отталкиваются. Полюсы разной полярности притягиваются.

Более всего сила магнитного действия проявляется у полюсов. На расстоянии, одинаково отстоящем от северного и южного полюса магнита, магнитные свойства его совсем не проявляются. Это место на магните называется *нейтральной линией*.

Магниты, сохраняющие свои магнитные особенности длительное время, называются *постоянными магнитами*. Если магниты нагревать, они теряют свои магнитные свойства. Эти свойства теряются также при ударах.

§ 37. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Притягивание и отталкивание магнитов происходит благодаря наличию магнитных сил. То *пространство, в котором можно обнаружить действие магнитных сил, называют магнитным полем*.

В каждой точке магнитного поля магнитные силы действуют в определенном направлении. Если в какой-

либо точке магнитного поля поместить магнитную стрелку, то она займет определенное положение, так как на концы ее действуют магнитные силы. Помещая стрелку в разных точках магнитного поля, можно проследить, как направлены линии действия магнитных сил. Линии, в направлении которых действуют магнитные силы, называют *магнитными силовыми линиями*. Действие магнитных сил направлено от северного полюса магнита к южному.

Магнитные силовые линии всегда замкнуты.

Таким образом, магнитное поле можно изобразить при помощи магнитных силовых линий. Однако не следует забывать, что линии эти в действительности не существуют. Ими пользуются только для того, чтобы

наглядно представить себе свойства магнитов и действие их в пространстве, *называемом магнитным полем*. Магнитные силовые линии помогают нам изучать свойства магнитного поля, но они изображают это поле только условно.

Направление и расположение силовых линий можно представить себе более наглядно, пользуясь железными опилками. Если на магнит наложить лист бумаги, картона или стекла, а затем сверху равномерно рассыпать железные опилки, то они расположатся в соответствии с силовыми линиями поля, как показано на рис. 39.

Такое расположение опилок объясняется тем, что каждая частица их в магнитном поле намагничивается и становится маленьким магнитом, который ведет себя так же, как и магнитная стрелка, помещенная в магнитном поле.

Если силовые линии магнитного поля параллельны между собой и магнитные силы одинаковы в каждой точке поля, то такое поле называется *однородным*.

Магнитное поле характеризуется его *напряженностью*. Напряженность магнитного поля определяется той силой, которая в данной точке

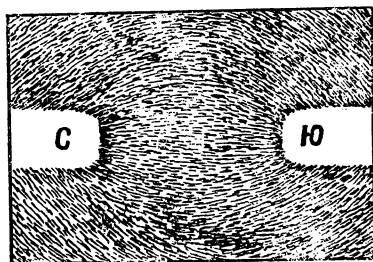


Рис. 39. Железные опилки в магнитном поле полюсов магнита.

действует на северный полюс элементарного магнита, когда величина его магнетизма равна единице. Эта сила измеряется в *динах*. В однородном поле напряженность его во всех точках одинакова.

Сравнивая магнитное поле с электрическим полем, необходимо отметить, что между ними имеется значительное внешнее сходство. Однако между этими полями есть и существенное различие. Силовые линии электрического поля начинаются у положительного заряда и кончаются у отрицательного. Силовые линии магнитного поля непрерывны, так как в магнитах нельзя отделить северный магнетизм от южного. Если во внешнем магнитном поле силовые линии начинаются от северного полюса и идут к южному, то внутри него эти линии продолжаются от южного полюса к северному.

§ 38. МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Через каждый квадратный сантиметр поперечного сечения поля условились проводить столько силовых линий, сколько дин имеет в данной точке его напряженность. Силовые линии поля, пронизывающие определенную площадь, выделенную в нем, называются *магнитным потоком*. О том, в какой точке магнитное поле сильнее или слабее, можно судить по величине, которая называется *магнитной индукцией*.

Магнитная индукция представляет собой магнитный поток, проходящий через единицу поверхности, перпендикулярной к направлению магнитного поля. Если магнитный поток однородного поля обозначить буквой Φ , а площадь, перпендикулярную к силовым линиям этого поля, буквой S , то величина магнитного потока может быть определена по формуле

$$\Phi = BS,$$

где B — магнитная индукция.

Для измерения магнитного потока пользуются единицей, которая называется *вольт-секунда*. Магнитную индукцию также измеряют в вольт-секундах на один квадратный метр. Вместо вольт-секунды иногда пользуются другой единицей, которая называется *максвелл* *. Одна

* По ГОСТ 9867—61 единица магнитного потока — вебер (вб).
 $1 \text{ вб} = 10^8 \text{ мкс}$.

вольт-секунда больше одного максвелла в сто миллионов раз.

Величину магнитной индукции можно получить, разделив величину, соответствующую магнитному потоку, на площадь поперечной поверхности, выраженную в метрах, через которую этот поток проходит,

$$B = \frac{\Phi}{S}.$$

Если магнитный поток в этой формуле дан в максвеллах, то магнитная индукция получается в единицах, которые называются гауссами *. Таким образом, если через площадку в один квадратный сантиметр, перпендикулярную к силовым линиям однородного поля, проходит магнитный поток, который равен одному максвеллу, то магнитная индукция при этом будет равна одному гауссу.

§ 39. МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Не все вещества одинаково проводят магнитные силовые линии. Через железо магнитные силовые линии проходят во много раз легче, чем через воздух. Распределение силовых линий магнитного поля, в котором находится железный брусок, показано на рис. 40. Из рисунка видно, что железо как бы втягивает в себя силовые линии. Способность железа проводить магнитный поток больше, чем окружающего воздуха, поэтому магнитная индукция в железе больше, чем в воздухе.

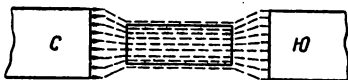


Рис. 40. Распределение силовых линий магнитного поля, в котором находится пластинка.

Величина, характеризующая магнитные свойства среды, в которой действует магнитное поле, называется магнитной проницаемостью. Ее обозначают греческой буквой μ (мю).

Величина, показывающая, во сколько раз магнитная индукция в каком-либо веществе больше, чем магнитная

* По ГОСТ 9867—61 единица магнитной индукции — тесла (тл). $1 \text{ тл} = 10^4 \text{ гс}$.

индукция в пустоте, называется *относительной магнитной проницаемостью* и обозначается буквой μ_r . Магнитная проницаемость пустоты обозначается буквой μ_0 .

Для любой среды ее магнитную проницаемость можно определить по формуле

$$\mu = \mu_r \mu_0.$$

Если магнитная проницаемость какого-либо вещества меньше единицы, то это вещество называют *диамагнитным*. В таких веществах магнитное поле слабее, чем при тех же условиях в пустоте.

Если относительная магнитная проницаемость материала больше единицы, то такой материал называют *парамагнитным*. К диамагнитным материалам относятся медь, серебро, углерод и другие. Вольфрам, платина, марганец и другие являются парамагнитными материалами. Если относительная магнитная проницаемость материала больше единицы во много раз, то такие материалы называют *ферромагнитными*. У ферромагнитных материалов относительная магнитная проницаемость выражается несколькими тысячами единиц. Эти материалы широко применяются в электротехнике, так как только их можно намагничивать. Железо, никель, кобальт и некоторые сплавы являются ферромагнитными материалами.

§ 40. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРОВОДНИКА С ТОКОМ

Если через проводник пропускать электрический ток и рядом с ним расположить магнитную стрелку, то эта стрелка займет определенное положение. Ее направление будет совпадать с плоскостью, перпендикулярной проводнику. Такое поведение магнитной стрелки свидетельствует о том, что вокруг проводника с током имеется магнитное поле. Силовые линии магнитного поля, образовавшегося вокруг проводника с током, располагаются концентрически, как это показано на рис. 41.

Направление силовых линий поля в этом случае можно определить следующим образом: если представить себе, что в конец проводника ввинчивается буравчик так, чтобы его движение совпадало с направлением тока, то направление вращения его рукоятки покажет нап-

равление магнитных силовых линий. Это определение называется *правилом буравчика*.

Два проводника с током, расположенные близко один к другому, будут притягиваться, если направление тока в них одинаковое. Эти проводники будут отталкиваться один от другого, если направление тока в них разное. Сказанное выше объясняется тем, что вокруг проводников с током образуются магнитные поля, которые взаимодействуют между собой. Эти магнитные поля пропорциональны силе тока, протекающего в каждом из проводников. Чем больше сила тока в проводнике, тем сильнее магнитное поле. С прекращением тока магнитное поле вокруг проводника исчезает.

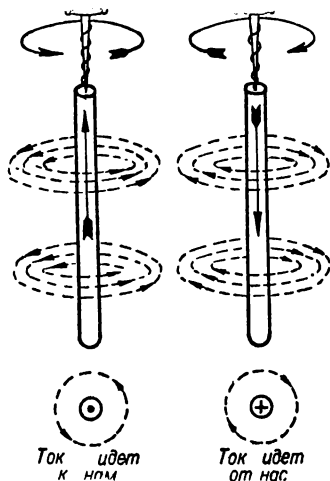


Рис. 41. Силовые линии магнитного поля проводника с током.

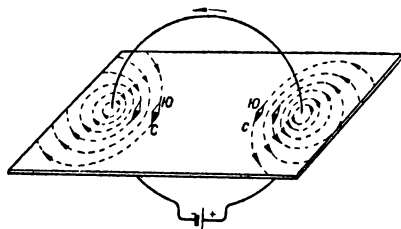


Рис. 42. Магнитное поле кольцевого проводника.

Если направление силовых линий определять по правилу буравчика, то можно убедиться, что они с одной стороны будут входить внутрь кольца, а с другой — выходить из него. Это положение справедливо как для правой, так и для левой части кольца. Силовые линии расположатся в плоскости, перпендикулярной к плоскости кольца, в соответствии с рис. 42. Изогнутый в кольцо проводник, часто называют *витком*.

Если проводник свернуть спиралью, то получим несколько витков, расположенных один за другим. Магнит-

ные поля витков будут складываться и образуют суммарное магнитное поле. Почти все силовые линии в этом случае будут охватывать все витки. Только некоторые из них образуют кольца, охватывающие отдельные витки.

Такой спиральный проводник образует катушку и называется *соленоидом*. Магнитное поле соленоида изображено на рис. 43. Оно очень похоже на магнитное поле постоянного магнита, имеющего прямолинейную форму.

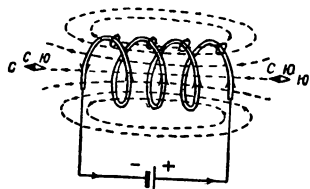


Рис. 43. Магнитное поле соленоида.

Силовые линии внутри соленоида направлены одинаково. Конец соленоида, из которого они выходят, является северным полюсом. Противоположный конец, в который силовые линии входят, является южным полюсом. Полюсы соленоида можно определить, пользуясь правилом буравчика в несколько измененном виде. Представим себе, что буравчик ввинчивается в соленоид так,

чтобы движение его ручки совпадало с направлением тока в витках соленоида. Тогда направление движения буравчика совпадает с направлением магнитных силовых

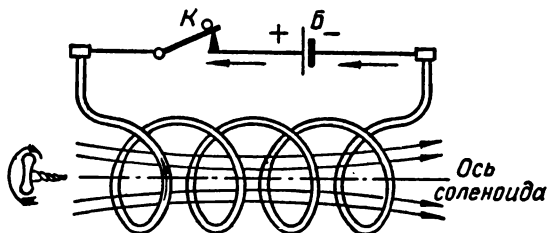


Рис. 44. Определение полюсов соленоида по правилу буравчика.

линий поля соленоида (рис. 44). Полярность соленоида можно определить, наложив правую руку на него таким образом, чтобы четыре пальца совпадали с направлением тока в витках. При этом отогнутый в сторону большой палец будет указывать северный полюс катушки (рис. 45).

Магнитное поле соленоида усиливается, если увеличивается ток, проходящий по виткам. При одном и том же токе магнитное поле больше у соленоида, имеющего большее количество витков. Таким образом, магнитные качества соленоида могут быть определены двумя величинами: силой тока и количеством витков.

Произведение числа витков на величину тока, выраженную в амперах, называют **ампер-витками**.



Рис. 45. Определение полюсов соленоида по правилу правой руки.

Если к соленоиду приблизить железный стержень, то он будет втягиваться внутрь соленоидной катушки. Стержень, оказавшийся в магнитном поле соленоида, намагничивается. При этом направление силовых линий будет таким, как это показано на рис. 46. У концов стержня образуются полюсы, которые определяются в соответствии с направлением пронизывающих его силовых линий. При этом южный полюс стержня окажется против северного полюса катушки. Втягивание стержня в катушку будет продолжаться до тех пор, пока нейтральные линии катушки и стержня не совместятся.

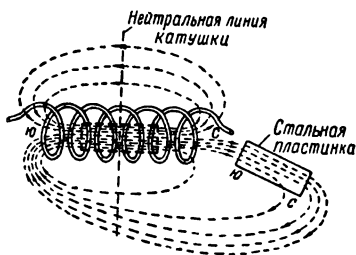


Рис. 46. Втягивание стального стержня соленоидом.

Принцип втягивания железных деталей в катушку соленоида используется во многих измерительных приборах и в разных электротехнических устройствах.

§ 41. ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ

Соленоид, внутри которого имеется железный стержень, называется **электромагнитом**. Наличие железа внутри соленоида усиливает его магнитное поле. Это усиление связано с тем, что железо отличается значительной магнитной проницаемостью. Железный стержень, помещенный внутри соленоида, называют *сердеч-*

ником. Витки соленоида часто называют его *обмоткой*. Большая часть обмотка электромагнита состоит из медной проволоки, которая наматывается в несколько слоев на каркас катушки. Полюсы электромагнита можно определить так же, как и полюсы обычного соленоида. Совершенно очевидно, что с изменением направления тока в обмотке электромагнита изменится направление магнитного потока, а значит и полюсов у его концов.

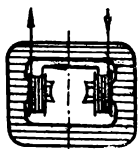


Рис. 47. Электромагнит с внутренними полюсами.

Электромагниты применяются в самых разнообразных электротехнических аппаратах и устройствах. Электромагниты имеются в электрических машинах, в телефонных и телеграфных аппаратах, в громкоговорителях, электрических звонках и в разных автоматических устройствах.

Сердечники электромагнитов и их катушки могут иметь разнообразную форму, которая определяется их назначением и применением. Встречаются довольно часто электромагниты с внутренними полюсами. Один из таких электромагнитов показан на рис. 47.

§ 42. ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ПРОВОДНИК С ТОКОМ

Проводник с током, находящийся в магнитном поле, перемещается в определенном направлении, пересекая силовые линии этого поля. Движение проводника объясняется тем, что магнитное поле, возникающее вокруг него, взаимодействует с внешним магнитным полем.

В результате этого взаимодействия с одной стороны проводника магнитные силовые линии будут сгущаться, и общее магнитное поле усилится. На противоположной стороне проводника суммарное магнитное поле ослабляется, так как силовые линии здесь имеют разное направление. Проводник с током при этом выталкивается в ту сторону, где имеется разрежение силовых линий. Направление движения проводника можно установить, пользуясь правилом левой руки.

Для определения направления движения проводника с током, находящегося в магнитном поле, надо левую руку рас-

положить в магнитном поле так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь, вытянутые четыре пальца совпадали с направлением тока в проводнике. При этом отогнутый большой палец укажет направление движения проводника. Расположение левой руки для определения движения проводника показано на рис. 48.

Сила, действующая на проводник с током, пропорциональна магнитной индукции, силе тока в проводнике и его длине. Таким образом, величина силы, перемещающей проводник, расположенный в однородном магнитном поле перпендикулярно магнитным силовым линиям этого поля, может быть определена следующим образом:

$$F = BIl,$$

где F — сила, действующая на проводник, B — магнитная индукция однородного поля, I — сила тока в проводнике и l — его длина.

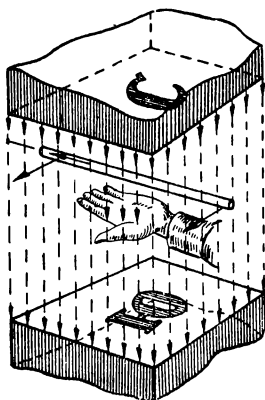


Рис. 48. Определение направления движения проводника с током по правилу левой руки.

§ 43. НАМАГНИЧИВАНИЕ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

К ферромагнитным материалам относятся сталь, железо, чугун, никель, кобальт.

Магнитная проницаемость ферромагнитных материалов значительно превышает проницаемость пустоты. Характерным признаком ферромагнитных веществ является зависимость магнитной проницаемости от напряженности того магнитного поля, в которое помещен ферромагнитный материал.

Способность ферромагнитных материалов намагничиваться может быть объяснена следующим образом.

Нам уже известно, что проходящий по проводнику ток образует вокруг этого проводника магнитное поле. С другой стороны, мы знаем, что электрический ток есть не что иное, как направленное перемещение свободных

электронов вдоль проводника. Одновременно в атомах, из которых состоят любые вещества, происходит непрерывное движение электронов вокруг атомных ядер по своим орбитам. Кроме того, каждый электрон атома, помимо движения по орбите вокруг атомного ядра, одновременно вращается вокруг своей оси. Это вращение подобно вращению волчка. Движение электрона можно рассматривать как своеобразный ток, создающий магнитное поле.

Пока ферромагнитный материал не намагничен, магнитные поля элементарных частиц внутри вещества расположены беспорядочно. В обычных условиях ненамагниченный ферромагнитный материал не проявляет магнитных свойств в окружающей его среде. Но как только ферромагнитное тело оказывается помещенным во внешнее магнитное поле, магнитные поля элементарных частиц внутри этого тела поворачиваются под действием внешнего магнитного поля так, что направление их совпадает. Сталь или железо, оказавшиеся в таких условиях, приобретают магнитные свойства.

Ферромагнитные материалы после прекращения их намагничивания оказываются намагниченными на протяжении долгого времени. Способность ферромагнитных материалов сохранять магнитные свойства после того как намагничивающее их поле исчезает называют *остаточным магнетизмом*. Одни материалы имеют весьма незначительный остаточный магнетизм, в других же он больше. К материалам, отличающимся наличием значительного остаточного магнетизма, относятся специальные сорта твердых сталей: вольфрамовой, хромистой, кобальтовой. Из них изготовляют постоянные магниты.

Явление остаточного магнетизма объясняется устойчивостью направления осей вращающихся электронов, ориентированных в одном направлении при намагничивании ферромагнитного материала. Эта устойчивость подобна устойчивости любого предмета, вращающегося с большой скоростью вокруг своей оси (волчка, колес велосипеда). Волчок не падает до тех пор, пока он вращается с большой скоростью.

Магнитные свойства ферромагнитных материалов часто характеризуют, пользуясь исследованием зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля. Эту зависимость изображают на графике в виде

кривой. По горизонтальной линии такого графика откладывают величины напряженности поля H , а по вертикальной оси — значение магнитной индукции B так, чтобы каждой величине напряженности поля H соответствовала связанная с ней величина магнитной индукции B . На рис. 49 изображены три линии намагничивания для разных материалов. Линии эти называют *кривыми намагничивания*. Они показывают, как протекает процесс намагничивания. Достаточно обратить внимание на характер этих кривых, чтобы сразу

же сделать заключение об особенностях процесса намагничивания. Вначале с возрастанием напряженности намагничивающего поля магнитная индукция увеличивается быстро, но потом процесс замедляется. К концу его кривые идут почти параллельно горизонтальной оси, по которой откладывают значения H . Это говорит о том, что здесь наступило

магнитное насыщение того или иного материала. *Магнитным насыщением* называют такое состояние ферромагнитного материала, при котором он не в состоянии уже воспринимать намагничивания. Магнитное насыщение объясняется тем, что все элементарные магнитики, образующиеся из атомных систем внутри вещества при данной величине напряженности намагничивающего поля, расположились уже вдоль этого поля и дальше собственное магнитное поле ферромагнитного вещества больше не может увеличиваться.

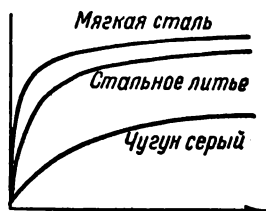


Рис. 49. Кривые намагничивания.

§ 44. ГИСТЕРЕЗИС

Предположим, что ферромагнитное вещество полностью размагничено. Поместим это ферромагнитное вещество в катушку самоиндукции, соединенную с источником э. д. с. При увеличении тока в катушке самоиндукции будет возрастать напряженность магнитного поля. С увеличением внешнего поля индукция ферромагнитного вещества растет сначала быстро (кривая *а, б, в, г, ж* на рис. 50), а затем медленно. Это происходит потому, что элементарные потоки ориентируются так, что магнитные по-

токи, создаваемые ими, добавляются к внешнему потоку. Магнитное состояние вещества приближается к насыщению, при котором уже почти все элементарные токи ориентированы так, что их магнитные потоки совпадают по направлению с внешним потоком. Кривая *а, б, в, г, ж*, соответствующая первоначальному намагничиванию материала, называется *первоначальной кривой намагничивания*.

С уменьшением напряженности поля индукция ферромагнитного вещества будет уменьшаться, но ее

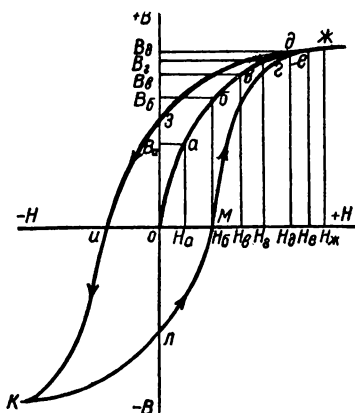


Рис. 50. Петля гистерезиса.

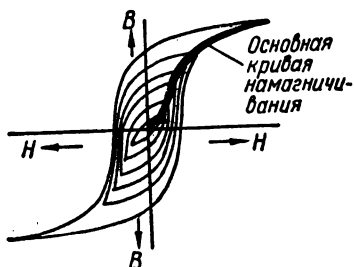


Рис. 51. Основная кривая намагничивания.

значения будут большими для соответствующих значений напряженности поля при намагничивании. Кривая размагничивания *д, з, и* пойдет выше кривой намагничивания *а, б, в, г, ж* (рис. 50).

При уменьшении величины напряженности поля до нуля в ферромагнитном веществе наблюдается остаточное намагничивание и соответствующая ему остаточная индукция (отрезок *оз*). Это объясняется тем, что элементарные токи в известной мере сохранили свою упорядоченную ориентацию.

Чтобы индукция стала равной нулю, напряженность поля должна принять определенное отрицательное значение, которое называется *задерживающей силой*.

Если напряженность поля довести до отрицательного значения $-H$, равного по абсолютной величине наибольшему положительному значению $+H$, то индукция примет отрицательное значение насыщения, соответствующее

щее значению точки K . Вновь увеличивая напряженность поля до наибольшего значения $+H$, мы получим кривую $k, л, м, д, е$. Таким образом, при повторном перемагничивании ферромагнитных материалов кривые намагничивания не совпадают одна с другой из-за наличия остаточного магнетизма. Отставание магнитной индукции от намагничивающего поля в ферромагнитном веществе называется *явлением гистерезиса*. Только после достаточного числа (примерно десяти) перемагничиваний мы получаем симметричный цикл гистерезиса. Кривая, характеризующая полный процесс перемагничивания, называется *петлей гистерезиса*.

Кривая (рис. 51), проходящая через вершины симметричных уменьшающихся петель гистерезиса, называется основной *кривой гистерезиса* и является вполне определенной для данного сорта материала.

глава 3

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

§ 45. ЯВЛЕНИЯ ИНДУКЦИИ

Предположим, что в магнитном поле, образовавшемся между концами постоянного магнита, находится проводник. Если этот проводник находится в покое, то в нем никакого тока не будет. Но стоит только сдвинуть его с места и перемещать так, чтобы он пересекал магнитные силовые линии, как тотчас же в проводнике появится электродвижущая сила и, как следствие ее, электрический ток. Эта электродвижущая сила называется *индуцированной э.д.с.*, а ток — *индуцированным током*. Явление, которое мы только что описали, носит название *электромагнитной индукции*. Чтобы в проводнике, перемещающемся в магнитном поле, появился ток, необходимо, чтобы элек-

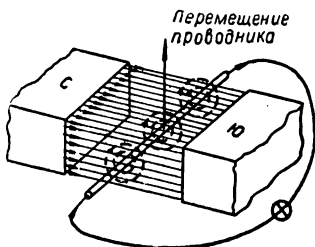


Рис. 52. Возникновение тока в проводнике, пересекающем магнитные силовые линии.

трическая цепь была замкнута, как это показано на рис. 52.

Индуктированный ток возникает в проводнике за счет той механической энергии, которая затрачивается при перемещении проводника в магнитном поле. При этом механическая энергия превращается в электрическую.

Совершенно аналогичное явление можно наблюдать и тогда, когда проводник остается на месте, а связанное с ним магнитное поле изменяется. Так, например, если катушка стоит на месте, а в нее быстро вводится посто-

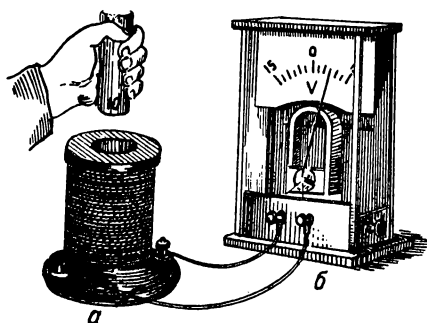


Рис. 53. Возникновение э. д. с. самоиндукции при вводе постоянного магнита в катушку:

а — катушка; б — гальванометр.

янный магнит, то включенный в цепь катушки измерительный прибор покажет, что и в этом случае возникает индуктированная э. д. с. (рис. 53).

Индуктированная электродвижущая сила возникает в замкнутом проводнике всегда, если число силовых линий, пронизывающих контур этого проводника, изменяется.

§ 46. ВЕЛИЧИНА И НАПРАВЛЕНИЕ Э. Д. С. ИНДУКЦИИ

Величина индуктированной э. д. с. зависит от напряженности магнитного поля, длины проводника, который пересекается магнитными силовыми линиями, и от скорости движения этого проводника в магнитном поле. Индуктированная э. д. с. будет тем больше, чем большее количество магнитных силовых линий пересекает проводник в единицу времени. Следовательно, величина индуктированной э. д. с. E пропорцио-

нальна магнитной индукции B , длине проводника l и скорости его перемещения в магнитном поле v .

Индуктированную э. д. с. можно определить по формуле

$$E = Blv.$$

Направление электродвижущей силы индукции в проводнике, который перемещается в магнитном поле, можно определить, пользуясь правилом правой руки. Это правило можно изложить так:

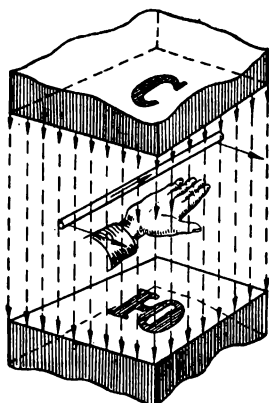


Рис. 54. Правило правой руки.

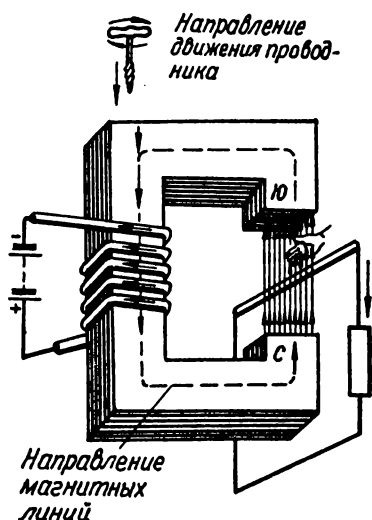


Рис. 55. Совместное применение правила буравчика и правой руки.

Если ладонь правой руки расположить так, чтобы магнитные силовые линии были ей перпендикулярны и входили в нее, а отогнутый большой палец указывал направление перемещения проводника, то остальные вытянутые пальцы будут направлены так, как направлена индуктированная в проводнике э. д. с. Применение правила правой руки для определения направления индуктированной э. д. с. показано на рис. 54.

Направление индуктированной э. д. с., а следовательно, и индуктированного тока можно также определить,

пользуясь правилом, которое открыл русский ученый Э. Х. Ленц. Это правило называют *законом Ленца*. Закон Ленца формулируется так.

Индуктированный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать причине, которая его вызвала. Так как причиной появления индуктированного тока является движение проводника, то индуктированный ток имеет такое направление, при котором возникающее вокруг него магнитное поле, взаимодействуя с внешним полем, препятствует его движению.

Таким образом, направление индуктированной э. д. с., возникающей в проводнике, который движется в пространстве между полюсами электромагнита, следует определять в соответствии с изложенным ниже порядком. Сначала, пользуясь правилом буравчика, надо определить направление магнитных линий. Как пользоваться правилом буравчика, нам уже известно. Затем, пользуясь правилом правой руки, найдем направление индуктированной в проводнике э. д. с. (рис. 55).

§ 47. ЯВЛЕНИЕ САМОИНДУКЦИИ

Нам уже известно, что индуктированная э. д. с. возникает в проводнике всегда, если изменяется магнитный поток, связанный с этим проводником. С другой стороны, мы знаем, что если в проводнике или катушке проходит ток, то при этом существует собственное магнитное поле отдельного проводника или катушки.

Представим себе, что ток, проходящий в обмотке катушки, изменяется. Тогда и магнитный поток, связанный с ней, тоже будет изменяться. Магнитные силовые линии этого потока пересекают витки катушки, поэтому все витки ее окажутся находящимися в переменном магнитном поле. Но если магнитное поле, сцепляющееся с витками, изменяется, то в обмотке катушки должна возникнуть индуктированная электродвижущая сила.

Такая электродвижущая сила, появляющаяся в катушке вследствие изменения ее собственного магнитного поля, называется *электродвижущей силой самоиндукции*. Нетрудно представить, что э. д. с. самоиндукции есть не что иное, как одна из разновидностей э. д. с. индукции.

Величина э. д. с. самоиндукции зависит от скорости изменения магнитного потока. Э. д. с. самоиндукции за-

висит также от коэффициента самоиндукции, или индуктивности. Коэффициент самоиндукции обозначают буквой L . Его величина будет тем больше, чем больше витков в катушке.

Коэффициент самоиндукции можно рассматривать как величину той э. д. с. самоиндукции, которая возникает при изменении тока в единицу времени.

Коэффициент самоиндукции, или индуктивность, измеряется в единицах, которые называются *генри* (*гн*).

Коэффициент самоиндукции в один генри имеет катушка, в которой при изменении тока на один ампер в одну секунду возникает электродвижущая сила самоиндукции один вольт. Часто пользуются единицами, составляющими одну тысячную генри (миллигенри) или же одну миллионную часть генри (микрогенри). Обозначения для этих единиц следующие: миллигенри — *мгн*, микрогенри — *мкгн*.



Рис. 56. Бифилярная обмотка.

Чтобы определить направление э. д. с. самоиндукции, надо пользоваться *законом Ленца*. При возрастании тока э. д. с. самоиндукции возникает такого направления, что препятствует возрастанию тока, который ее создает. В этом случае э. д. с. самоиндукции имеет направление, противоположное току, который ее вызвал.

Если ток уменьшается, то э. д. с. самоиндукции при этом препятствует его уменьшению, т. е. имеет такое же направление, как и ток.

Коэффициент самоиндукции катушки, имеющей железный сердечник, больше, чем у катушки, которая его не имеет. Катушки с железным сердечником, имеющие большой коэффициент самоиндукции, называют *дросселями*.

Очень часто явления самоиндукции сравнивают с явлением инерции, так как возникающий благодаря появлению э. д. с. самоиндукции ток всегда имеет направление, противоположное основному току. Этот вторичный ток уменьшает величину основного тока и противодействует его изменению.

В тех случаях, когда по техническим условиям надо иметь катушку с весьма малым коэффициентом индукции, применяют *бифилярные обмотки*. Чтобы получить

бифилярную обмотку, проволоку складывают вдвое и в таком виде наматывают на каркас катушки. Вполне понятно, что при такой намотке ток в каждых двух соседних витках имеет противоположные направления, поэтому действие магнитного потока одного витка уничтожается действием другого, а суммарный магнитный поток для такой обмотки должен равняться нулю (рис. 56).

§ 48. ЯВЛЕНИЕ ВЗАИМОИНДУКЦИИ

Если две катушки расположены одна возле другой и в каждой из них изменяется ток, то они будут взаимно влиять одна на другую. Изменение величины тока в первой катушке вызовет появление индуктированной э. д. с. во второй катушке и, наоборот, изменение тока и магнитного поля второй катушки будет причиной появления индуктированной э. д. с. в первой из них. Это явление называется взаимоиנדукцией, а э. д. с., возникающую вследствие взаимного влияния катушек, называют *электродвижущей силой взаимоиנדукции*.

Таким образом, явление взаимоиנדукции — это тоже одна из разновидностей электромагнитной индукции. Явление взаимоиנדукции характеризуется *коэффициентом взаимоиנדукции*, который обозначают буквой *M*. Его называют также взаимной индуктивностью. Коэффициент взаимоиנדукции измеряют в тех же единицах, что и коэффициент самоиндукции, т. е. в генри и миллигенри.

Взаимоиנדукция один генри будет между двумя цепями тогда, когда в одной из них возникает э. д. с. взаимоиנדукции, равная одному вольту при изменении тока в другой на один ампер за одну секунду.

Направление э. д. с. взаимоиנדукции можно определить, пользуясь правилом Ленца. Величина взаимоиנדукции *M* может быть представлена в виде математической зависимости коэффициентов самоиндукции двух влияющих одна на другую цепей. Если магнитный поток, появляющийся в первой цепи, полностью захватывает вторую цепь, то коэффициент взаимоиנדукции можно выразить следующим образом:

$$M = \sqrt{L_1 L_2}.$$

Если же магнитный поток частично рассеивается, то коэффициент взаимоиנדукции *M* меньше квадратного

корня из произведения коэффициентов самоиндукции влияющих одна на одну цепей:

$$M < \sqrt{L_1 L_2}.$$

Явление взаимной индукции используется в электротехнических устройствах, которые применяются для повышения и понижения напряжения переменного тока. Такие устройства называют *трансформаторами*.

§ 49. ВИХРЕВЫЕ ТОКИ

Явление индукции является причиной возникновения внутри металлов паразитных токов. Эти токи называют *вихревыми*.

Природа этих токов индуктивная, и возникают они в соответствии с правилом Ленца. Вихревые токи возникают в массивных проводниках, находящихся в изменяющемся магнитном поле. Каждый такой ток образует как бы свой небольшой электромагнит. Магнитные поля, образованные вихревыми токами, взаимодействуют с основным полем.

Вихревые токи возникают в железных сердечниках катушек, применяющихся в различных электротехнических устройствах. Следствием появления вихревых токов является нагревание металла, которое может достигать значительной величины.

Для устранения вихревых токов часто железные сердечники изготовляют из отдельных пластин, которые между собой изолированы.

В металлургии вихревые токи используются для плавки металлов. Торможение, которое появляется вследствие взаимодействия магнитного поля, создаваемого вихревыми токами, и основного магнитного поля, используется в некоторых измерительных устройствах.

Таким образом, вихревые токи не только вызывают вредное нагревание электротехнических приборов и аппаратов, но и могут иметь полезное применение.

§ 50. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Между электрическими и магнитными явлениями существует неразрывная связь. Электрическое и магнитное поле — это только разные проявления одного и того же

электромагнитного поля. Если мы наблюдаем только электрическое или только магнитное поле, то это значит, что мы имеем дело с частными случаями проявления единого электромагнитного поля. В определенных условиях мы можем обнаруживать только электрическое или же только магнитное поле.

Единство электромагнитных явлений можно показать, рассматривая магнитное поле постоянных магнитов. В веществе магнита существуют элементарные электрические токи, которые есть не что иное, как движение элементарных электрических зарядов. Каждый электрический заряд имеет вокруг себя электрическое поле.

Таким образом, исследование одного электрического или одного магнитного поля создает определенные удобства, облегчает расчет электрических цепей и магнитных устройств. Однако не следует забывать, что электрические и магнитные явления всегда сопровождают одно другое.

**ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ****§ 51. ОПРЕДЕЛЕНИЕ**

Переменным током называется такой ток, который с течением времени изменяется по величине и по направлению.

В современной электротехнике переменный ток получил весьма широкое распространение. Его повсеместное применение обусловлено тем, что переменный ток имеет ряд технических преимуществ перед постоянным током.

Строго говоря, любые токи, изменяющиеся по величине во времени, являются по существу переменными. Однако в теории и практике электротехники под названием переменного тока принято подразумевать более узкую и вполне определенную категорию электрического тока — периодический переменный ток.

Периодическим переменным током в электротехнике называют такой ток, изменения которого по величине и направлению полностью повторяются через одинаковые промежутки времени.

Время, в течение которого переменный ток или переменная э. д. с. совершают полностью свое изменение, возвращаясь снова к исходной величине и направлению, называют *периодом тока или периодом э. д. с.* Период обозначают буквой T .

§ 52. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Источниками переменного тока служат генераторы различных конструкций. В технике сильных токов для этой цели служат электрические машины, работающие

по принципу перемещения проводников в магнитном поле полюсов машины, создающих магнитный поток. Такие электрические машины называются *генераторами переменного тока*.

В обмотках возбуждения генераторов переменного тока протекает постоянный ток. Схема такого генератора показана на рис. 57. Неподвижная часть этого генератора называется *статором*, а вращающаяся — *ротором*.

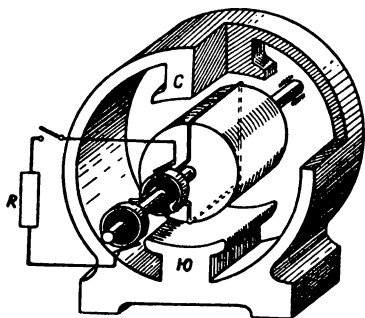


Рис. 57. Схема генератора переменного тока.

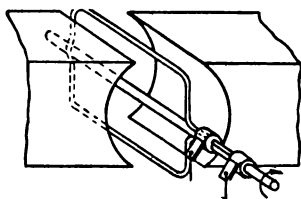


Рис. 58. Вращение витка между полюсами магнита.

Представим себе, что между полюсами машины вращается на оси только один виток провода, имеющий форму прямоугольника. Концы этого витка присоединяются к контактным кольцам, находящимся на его оси. Контактные кольца соприкасаются со скользящими по их поверхности контактами — щетками. Такое устройство изображено на рис. 58.

Если виток вращается, то магнитные силовые линии, проходящие от полюса к полюсу, в разном положении этого витка будут пронизывать его в различном количестве. Магнитный поток, сцепляющийся с прямоугольным витком, будет изменяться в определенных пределах. Совершенно очевидно, что при горизонтальном положении витка поток, проходящий сквозь него, будет равен нулю. В дальнейшем, по мере того, как угол поворота витка по отношению к горизонтальной линии будет увеличиваться, начнет возрастать и магнитный поток, который пронизывает плоскость витка. Наибольший магнитный по-

ток будет пронизывать плоскость витка тогда, когда виток займет вертикальное положение. В процессе вращения витка его горизонтальные части пересекают силовые линии магнитного поля. Следовательно, в этих частях проводника должна при этом возникать э. д. с., направление которой можно определить, пользуясь правилом правой руки.

В тот момент, когда плоскость витка перпендикулярна направлению магнитных силовых линий, горизонтальные части витка перемешаются вдоль силовых линий и не пересекают их. Магнитный поток, пронизывающий контур витка, при этом остается неизменным, а, следовательно, э. д. с., индуцируемая в витке, будет равна нулю. В процессе дальнейшего вращения величина магнитного потока, проходящего через контур витка, начнет уменьшаться. Но если изменяется магнитный поток, пронизывающий контур витка, то в нем начнет индуцироваться э. д. с. По мере того как виток, вращаясь, будет уходить из рассматриваемого нами начального положения, скорость пересечения силовых линий будет возрастать. Это значит, что возрастает и э. д. с. Наибольшая скорость пересечения силовых линий должна быть тогда, когда удлинённые стороны прямоугольного витка проходят под серединами полюсов. На нашем рисунке виток занимает горизонтальное положение. Но если скорость пересечения силовых линий в этом положении наибольшая, то э. д. с., индуцируемая в проводниках витка, будет наибольшей. В процессе дальнейшего вращения э. д. с. в проводнике имеет другое направление, когда проводники, составляющие горизонтальные части витка, проходят под полюсами других наименований. После того как виток сделает полный оборот, весь процесс изменения э. д. с. будет повторяться во всех своих стадиях.

Таким образом, когда магнитный поток, пронизывающий плоскость витка, достигает наибольшей величины, индуцированная в витке э. д. с. будет наименьшей. Когда же величина магнитного потока, проходящего через виток, достигает нуля, индуцируемая в витке э. д. с. имеет наибольшее значение. В течение первой половины оборота индуцируемая в витке э. д. с. имеет одно направление, а во второй половине оборота направление ее становится противоположным. В промежутках между

этими моментами э. д. с. изменяется по величине от нуля до некоторого наибольшего значения, затем начинает уменьшаться снова до нуля. Во второй половине оборота индуктируемая э. д. с. опять возрастает от нуля до своего максимального значения, но только в другом направлении, после чего к концу оборота снова уменьшается до нуля. Весь этот цикл изменений соответствует одному периоду. Число таких изменений, происходящих в течение одной секунды, называют *частотой переменной* э. д. с. Частоту принято обозначать буквой f . Между продолжительностью одного периода, выраженной в секундах или ее долях, и частотой всегда существует следующее соотношение:

$$f = \frac{1}{T}.$$

Частоту обыкновенно измеряют в герцах (гц). Частота равна количеству колебаний переменной э. д. с. или переменного тока в одну секунду.

§ 53. ИЗМЕНЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И Э. Д. С. ПО ГАРМОНИЧЕСКОМУ ЗАКОНУ

Изменение э. д. с., которое мы рассматривали в предыдущем параграфе, часто называют *гармоническим*. Если какая-либо величина изменяется по гармоническому закону, то это значит, что в процессе ее изменения она постепенно и плавно нарастает от нулевого значения до максимального. В дальнейшем такая величина также постепенно и плавно уменьшается до нуля, причем, уменьшаясь, она в точности проходит через те значения, которые эта величина имела в процессе нарастания. Каждое такое значение изменяющейся величины, соответствующее определенному моменту времени, называют ее *фазой*. Таким образом, при увеличении и уменьшении величины, изменяющейся по гармоническому закону, ее фазы повторяются. В процессе дальнейшего изменения такая величина снова плавно возрастает от нуля до наибольшего значения, но только в направлении, противоположном первоначальному. Достигнув наибольшего

значения, эта величина плавно убывает до нуля. Как уже упоминалось выше, весь процесс изменения происходит за время, которое называют *периодом изменения*. Изменение, происходящее в одном направлении, протекает за половину периода.

Примером такого изменения по гармоническому закону могут служить величины отклонения качающегося маятника. Когда маятник находится в строго отвесном положении, отклонение его равно нулю. Если в процессе

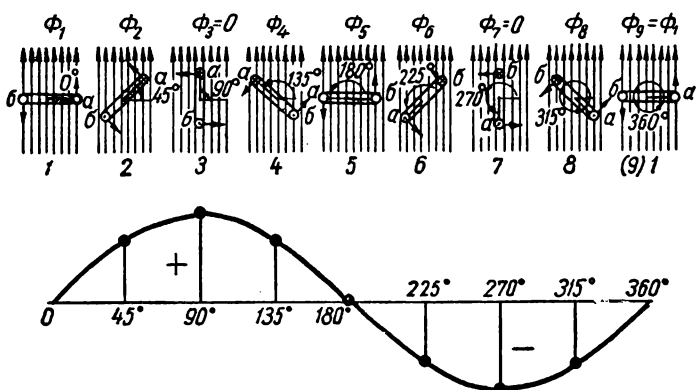


Рис. 59. Построение синусоиды.

качания он отходит в одну сторону, то величина его отклонения постепенно увеличивается, достигает наибольшего значения и снова возвращается к нулю в отвесном положении. В дальнейшем отклонение его происходит в противоположную сторону, причем все значения отклонения в эту сторону повторяются по величине так же, как это происходило в первой половине движения.

Такой процесс изменения какой-либо величины можно изобразить на рисунке, откладывая по горизонтальной линии отрезки, соответствующие изменению времени или различным фазам изменяющейся величины. По вертикальному направлению надо откладывать отрезки, соответствующие значениям изменяющейся величины в различные моменты времени. По горизонтальной оси откладывают отрезки прямой, соответствующие в определенном масштабе промежуткам времени, которое прош-

ло от начала рассматриваемого процесса. Если концы этих отрезков соединить плавной линией, то получится кривая линия, называемая *синусоидой*. Такая синусоида изображена на рис. 59.

Возвратимся теперь к рассмотрению той переменной э. д. с., которая получается при вращении прямоугольного витка между полюсами магнитов. Если последовательно проследить все изменения этой э. д. с., соответствующие разным положениям вращающегося витка, то можно убедиться, что изменение индуктируемой э. д. с. происходит также по гармоническому закону и может быть представлено графически в виде той же синусоиды, которая изображена на рис. 59. На этом рисунке по горизонтальной линии отложены отрезки, соответствующие разным величинам угла поворота витка, выраженного в градусах. По вертикальному направлению откладываются соответствующие данному углу поворота значения э. д. с.

В каждый момент времени величину э. д. с. можно определить, измерив такой вертикальный отрезок. Надо только при этом учитывать масштаб, которым пользовались при изображении изменений э. д. с. Каждому моменту изменения соответствует свое значение э. д. с. Значение э. д. с. в любой момент времени называется ее *мгновенным значением*.

Все сказанное выше об электродвижущей силе относится, конечно, и к синусоидальному переменному току. Наибольшие значения синусоидального тока или синусоидальной э. д. с., которые получаются за время одного периода, называют *амплитудой*. Таким образом, в течение одного периода переменный ток или переменная э. д. с. достигают наибольших значений дважды: один раз тогда, когда изменение их происходит в положительном направлении, и другой — при изменении в отрицательном направлении.

Мгновенные значения переменного тока, э. д. с. или напряжения принято обозначать строчными буквами *i*, *e*, *u*.

Амплитудные значения этих величин обозначают прописными буквами, имеющими внизу значок *m*.

ГРАФИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 54. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ТРИГОНОМЕТРИИ

Изучение переменного тока весьма затруднительно, если изучающий не усвоил основных сведений из тригонометрии. Поэтому основные положения тригонометрии, которые могут понадобиться в дальнейшем, мы приводим в этом параграфе.

Известно, что в геометрии принято, рассматривая прямоугольный треугольник, называть сторону, лежащую против прямого угла, *гипотенузой*. Стороны, примыкающие к прямому углу, называются *катетами*. Прямой угол имеет 90° . Таким образом, на рис. 60 гипотенузой является сторона, обозначенная буквами, Ob , катетами же — стороны ab и aO .

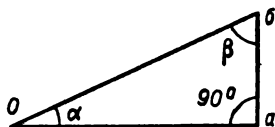


Рис. 60. Прямоугольный треугольник.

На рисунке отмечено, что прямой угол имеет 90° , два других угла треугольника являются острыми и обозначены буквами α (альфа) и β (бета).

Если измерить в определенном масштабе стороны треугольника и взять отношение величины катета, лежащего против угла α , к величине гипотенузы, то такое отношение называют синусом угла α и обозначают $\sin \alpha$. Следовательно, в прямоугольном треугольнике, который мы рассматриваем,

$$\sin \alpha = \frac{ab}{Ob}.$$

Если составить отношение, взяв величину катета aO , примыкающего к острому углу α , к гипотенузе, то это отношение называют *косинусом угла α* . Косинус угла обозначают $\cos \alpha$. Таким образом,

$$\cos \alpha = \frac{Oa}{Ob}.$$

Зная синус и косинус угла α , можно определить величины катетов. Если умножить величину гипотенузы Ob

на $\sin \alpha$, то получим катет ab . Умножив гипотенузу на $\cos \alpha$, получим катет Oa .

Предположим, что угол альфа не остается постоянным, а постепенно изменяется, увеличиваясь. Когда угол равен нулю, синус его также равен нулю, так как нулю равен противолежащий углу катет.

По мере того как угол α будет возрастать, начнет увеличиваться и его синус. Наибольшее значение синуса получится, когда угол альфа станет прямым, т. е. будет равен 90° . При этом синус равен единице. Таким образом, синус угла может иметь наименьшее значение — 0 и наибольшее — 1. Для всех промежуточных значений угла синус является правильной дробью.

Косинус угла будет наибольшим, когда угол равен нулю. При этом косинус равен единице, так как катет, прилежащий к углу, и гипотенуза в этом случае будут совпадать друг с другом, и отрезки, изображающие их, равны между собой. Когда угол равен 90° , косинус его равен нулю.

§ 55. ГРАФИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Синусоидальный переменный ток или э. д. с., изменяющиеся во времени, можно изобразить в виде синусоиды. Такой способ изображения часто применяется в электротехнике. Наряду с изображением переменного тока в виде синусоиды широко применяется также изображение такого тока в виде векторов.

Вектором называется величина, имеющая определенное значение и направление. Такую величину представляют в виде отрезка прямой линии со стрелкой на конце. Стрелка должна указывать направление вектора, а отрезок, измеренный в определенном масштабе, дает величину вектора.

Все фазы изменения переменного синусоидального тока за один период можно изобразить при помощи векторов, действуя следующим образом. Предположим, что начало вектора находится в центре окружности, а конец его лежит в самой окружности. Этот вектор, вращаясь по направлению против часовой стрелки, совершает полный оборот за время, соответствующее одному периоду изменения тока. Проведем из точки, определяющей на-

чало вектора, т. е. из центра окружности O , две линии: одну горизонтальную, а другую вертикальную, как это изображено на рис. 61.

Если для каждого положения вращающегося вектора из его конца, обозначенного буквой A , опускать перпендикуляры на вертикальную линию, то отрезки этой линии от точки O до основания перпендикуляра a будут представлять мгновенные значения синусоидального переменного тока, а сам вектор OA в определенном масштабе изображает амплитуду этого тока, т. е. его наибольшее значение. Отрезки Oa на вертикальной оси называются проекциями вектора OA на ось y .

В справедливости изложенного выше не трудно убедиться, выполнив следующее построение. Рядом с окружностью на рисунке можно получить синусоиду, соответствующую изменению переменной э. д. с. за один период, если вдоль горизонтальной линии откладывать градусы, определяющие фазу изменения э. д. с., а в вертикальном направлении строить отрезки, равные величине проекции вектора OA на вертикальную ось. Выполнив такое построение для всех точек окружности, по которой скользит конец вектора OA , получим рис. 62.

Полный период изменения тока, а следовательно, и вращения изображающего его вектора можно представить не только в градусах окружности, но и в радианах.

Углу в один градус соответствует $1/360$ часть окружности, описанной из его вершины. Измерить тот или иной угол в градусах — это значит найти, сколько раз такой элементарный угол содержится в измеряемом угле.

Однако при измерении углов можно пользоваться не градусами, а радианами. За радиан принимается угол, которому соответствует дуга, равная по длине радиусу любой окружности, описанной из вершины измеряемого угла.

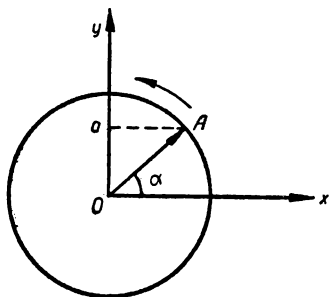


Рис. 61. Изображение синусоидального тока с помощью вектора.

Таким образом, полный угол, соответствующий любой окружности, измеренный в градусах, равен 360° . Этот же угол, измеренный в радианах, равен 2π — 6,28 радиан.

О положении вектора в данный момент можно судить по угловой скорости его вращения и по времени, которое прошло от начала вращения, т. е. с начала периода. Если обозначить угловую скорость вектора буквой ω (омега), а время с начала периода — буквой t , то угол

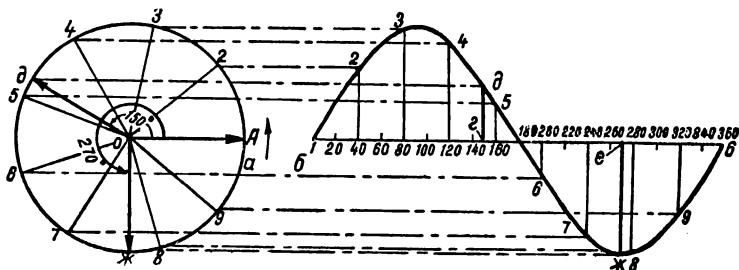


Рис. 62. Построение синусоиды э. д. с., изменяющейся по гармоническому закону.

поворота вектора по отношению к его исходному положению можно определить как произведение:

$$\alpha = \omega t.$$

Угол поворота вектора определяет его фазу, которой соответствует то или иное мгновенное значение тока. Следовательно, по углу поворота или фазовому углу можно судить о том, какое мгновенное значение имеет ток в интересующий нас момент времени. Фазовый угол часто называют просто *фазой*.

Выше было показано, что угол полного оборота вектора, выраженный в радианах, равен 2π . Этому полному обороту вектора соответствует один период изменения переменного тока. Умножив угловую скорость ω на время T , соответствующее одному периоду, получим полный оборот вектора переменного тока, выраженный в радианах:

$$\omega T = 2\pi.$$

Отсюда нетрудно определить, что угловая скорость

$$\omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Заменяв период T отношением $\frac{1}{f}$, получим

$$\omega = 2\pi f.$$

Угловая скорость ω в соответствии с этим математическим соотношением часто называется *угловой частотой*.

§ 56. ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ

Если в цепи переменного тока действует не один какой-либо ток, а два или несколько, то их взаимное соотношение удобно представлять графически. Графическое изображение электротехнических величин (тока, э. д. с. и напряжения) можно осуществлять двумя способами.

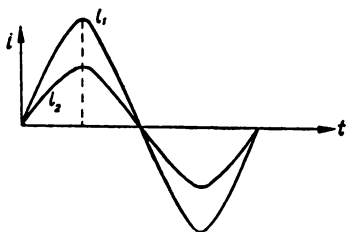


Рис. 63. Синусоиды токов, совпадающих по фазе.

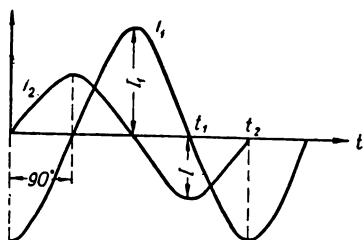


Рис. 64. Синусоиды токов, сдвинутых по фазе на 90° .

Один из этих способов — вычерчивание синусоид, показывающих все фазы изменения электротехнической величины в течение одного периода. На таком рисунке можно увидеть прежде всего, какое соотношение максимальных значений имеют исследуемые токи, э. д. с. и напряжения. На рис. 63 изображены две синусоиды, характеризующие изменения двух разных переменных токов. Эти токи имеют одинаковый период и совпадают по фазе, но максимальные значения их разные. Ток I_1 имеет большую амплитуду, чем ток I_2 . Однако не всегда токи или напряжения могут совпадать по фазе.

Часто бывает так, что фазы у них разные. В этом случае говорят, что они сдвинуты по фазе. На рис. 64 изображены синусоиды двух токов, сдвинутых по фазе. Угол сдвига фаз между ними равен 90° , что составляет одну четверть периода. На рисунке видно, что максимальное значение тока I_2 наступает раньше на четверть периода, чем максимальное значение тока I_1 . Ток I_2 опережает по фазе ток I_1 на четверть периода, т. е. на 90° .

Это соотношение между токами можно изобразить при помощи векторов. На рис. 65 изображены два вектора тех же токов. Если вспомнить, что направление вращения векторов условились принимать против часовой стрелки, то становится очевидным, что вектор тока I_2 , вращаясь в условном направлении, идет впереди вектора тока I_1 . Ток I_2 опережает ток I_1 . На этом же рисунке видно, что угол опережения равен 90° . Этот угол и является углом сдвига фаз между I_2 и I_1 . Угол сдвига фаз обозначают буквой φ (фи). Такой способ изображения электротехнических величин при помощи векторов называют *векторной диаграммой*.

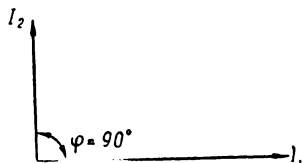


Рис. 65. Векторная диаграмма токов, сдвинутых по фазе на 90° .

При вычерчивании векторных диаграмм совершенно не обязательно изображать на рисунке окружности, по которым скользят концы векторов в процессе воображаемого их вращения.

Пользуясь векторными диаграммами, не следует забывать, что на одной диаграмме можно изображать только электрические величины, имеющие одинаковую частоту, т. е. одинаковую угловую скорость вращения векторов.

Пример 25. При частоте f , равной 16 гц, максимальное значение синусоидальной электродвижущей силы равно 80 в. Необходимо определить, чему равен период этой э. д. с. и угловая частота. Пользуясь рис. 59, определить, чему равно мгновенное значение э. д. с., когда фазовый угол составляет 150° и когда фазовый угол равен $\frac{3}{4} T$.

Решение. Период можно определить, пользуясь формулой

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{16} = 0,0625 \text{ сек.}$$

Угловая частота определяется по формуле

$$\omega = 2\pi f = 4 \cdot 3,14 \cdot 16 = 100,48 \approx 100.$$

Если пользоваться масштабом, то можно убедиться из рисунка в том, что когда фазовый угол равен 150° мгновенное значение э. д. с. составляет половину амплитуды, т. е. равно 40 в. Когда же фазовый угол равен $\frac{3}{4} T$, т. е. составляет 270° , то мгновенное значение э. д. с. равно 80 в. Таким образом в этот момент э. д. с. достигает своего максимального отрицательного значения.

**АКТИВНО-РЕАКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ
В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА****§ 57. ПОНЯТИЕ О ПОВЕРХНОСТНОМ ЭФФЕКТЕ**

Если тщательно измерить сопротивление проводника при переменном токе и сравнить его с сопротивлением проводника при постоянном токе, то оказывается, что в первом случае оно несколько больше.

Причина этого заключается в том, что переменный ток распределяется по площади поперечного сечения проводника неравномерно. Плотность переменного тока у поверхности проводника больше, а к центру меньше.

Такое неравномерное распределение переменного тока по сечению проводника связано с тем, что магнитный поток, вызванный током и охватывающий внутренние слои проводника, больше, чем тот магнитный поток, который сцепляется с элементами проводника, лежащими у его поверхности.

Это явление неравномерного распределения переменного тока в проводнике называют *поверхностным эффектом*.

Сущность этого явления может быть объяснена следующим образом. Если в первоначальный момент своего возникновения переменный ток равен нулю, то магнитного поля вокруг проводника еще нет. По мере того как ток увеличивается, концентрические силовые линии расходятся от центра проводника в направлении поверхности его, подобно тому как расширяются кольца дыма, выходящие из трубы, или расходятся волны по поверхности воды от места, в которое брошен камень.

Те частицы проводника, которые лежат ближе к центру, будут пересекаться большим количеством силовых линий, чем частицы, лежащие дальше от центра. Меньше всего силовых линий пересекут частицы, находящиеся на поверхности проводника.

Известно, что при пересечении проводника, а в нашем случае отдельных частиц металла, из которых состоит проводник, силовыми линиями магнитного поля в них возникает э. д. с. индукции. Эта э. д. с. должна быть больше там, где проводник пересекается большим числом си-

ловых линий, т. е. в центральной части проводника. Но мы знаем, что индуктированная э. д. с. должна быть направлена против основного тока, вызвавшего ее. Таким образом, по внутренним частицам m , изображенным на рис. 66, кроме основного тока, будет протекать противоположный по направлению индуктированный ток, вызванный *индуктированной* в этих частицах э. д. с. Ток такого же характера, протекающий по внутренним частицам n , будет меньше. Отсюда следует, что основной ток в центре проводника должен быть меньше, а у поверхности больше. Другими словами, плотность переменного

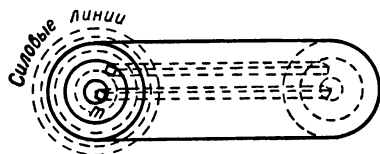


Рис. 66. Поверхностный эффект.

тока, распределяющегося по сечению данного проводника, неодинакова, — она больше у поверхности проводника и меньше к его центру.

Поверхностный эффект как бы уменьшает

полезное сечение провода, а значит увеличивает его сопротивление.

Сопротивление проводника переменному току называют *активным сопротивлением* в отличие от того сопротивления, которое получается при постоянном токе. Если частота переменного тока возрастает, то поверхностный эффект увеличивается. При очень больших частотах практически получается так, что внутри проводника тока нет совсем. Поэтому в некоторых случаях, когда имеют дело с переменными токами высокой частоты, пользуются не сплошными проводниками, а трубчатыми. Такие трубчатые проводники часто применяют в радиотехнике.

§ 58. АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Чисто активное сопротивление переменному току практически имеют электрические лампы накаливания, реостаты, провода. Активное сопротивление обозначают буквой R . Сопротивление электрических цепей или их элементов постоянному току иногда называют *омическим сопротивлением*.

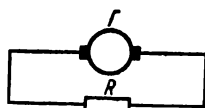


Рис. 67. Цепь переменного тока с активным сопротивлением.

Активное сопротивление в электрических схемах изображается так, как показано на рис. 67.

§ 59. РЕАКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Если в цепь переменного тока включить прибор, измеряющий силу тока, и обыкновенную лампу накаливания, то при одном и том же напряжении, подводимом к такой цепи, лампа накаливания будет гореть одинаково и при частоте 50 *гц*, и при частоте, в десять раз большей промышленной частоты. Амперметр при этом в одном и в другом случае показывает одинаковую силу тока.

Но если в цепь переменного тока включить еще катушку индуктивности, то при меньшей частоте лампа будет гореть ярче, а при большей частоте яркость ее горения станет меньше. Очевидно, что индуктивная катушка оказывает дополнительное сопротивление, которое возрастает с увеличением частоты переменного тока. Увеличение сопротивления, а значит, уменьшение тока покажет и амперметр, включенный в цепь.

Ток еще больше уменьшится, если при данной частоте в цепь включить такую же катушку, имеющую железный сердечник. Яркость горения лампы при включении катушки с сердечником значительно понизится. Все это свидетельствует о том, что в цепи переменного тока, кроме активного сопротивления, надо считаться и с тем дополнительным сопротивлением, которое возникает при включении катушки индуктивности. Сопротивление, которое вносит в цепь переменного тока катушка индуктивности, называют *индуктивным сопротивлением*.

При включении в цепь переменного тока конденсатора последовательно с лампочкой лампа будет гореть и при частоте 50 *гц*, и при частоте 500 *гц*, и при других частотах. Таким образом, емкость, включаемая в цепь переменного тока, не разрывает эту цепь. Но при более низких частотах лампа будет гореть менее ярко, а при повышении частоты яркость ее горения будет возрастать. Таким образом, сопротивление, которое вносит конденсатор в цепь переменного тока, становится меньше, если частота этого тока возрастает.

Сопротивление, которое появляется в цепи переменного тока благодаря наличию конденсатора, называют *емкостным сопротивлением*.

Индуктивное и емкостное сопротивление называют *реактивными сопротивлениями*.

§ 60. ТЕПЛОВОЕ ДЕЙСТВИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Хотя между поведением переменного и постоянного тока при прохождении в электрических цепях наблюдается значительная разница, они имеют также весьма важные общие особенности.

И постоянный ток, и ток переменный, проходя по проводникам, выделяют тепло. Тепловое действие постоянного и переменного тока можно определить по известному закону Джоуля — Ленца. Но при этом для переменного тока надо исходить из того, какое действие он производит в то или иное мгновение. В течение одного периода переменный ток имеет разные значения. Вполне понятно, что и количество тепла, выделяемое током в проводнике в разные моменты периода, должно быть разное. Однако о нагревании проводника можно судить по тому, какое количество тепла выделится в общем за какой-то определенный отрезок времени, например за один период. Для этого надо суммировать те *мгновенные значения количества тепла*, которые в течение периода выделяются разными по величине *мгновенными токами*.

§ 61. ДЕЙСТВУЮЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Ввиду того что в течение периода переменный ток изменяется, о величине его судят не по этим мгновенным значениям, а по действующему значению переменного тока. О действии переменного тока судят по тепловому эффекту, который сравнивают с тепловым эффектом постоянного тока.

Действующим значением переменного тока называют такую величину, которая равна величине постоянного тока, выделяющего такое же количество тепла, какое выделяет данный переменный ток за одно и то же время.

Действующее значение синусоидального переменного тока меньше того максимального значения, которого достигает этот ток в процессе своих изменений. Отношение максимального значения переменного тока к его действующему значению

$$\frac{I_m}{I} = \sqrt{2} = 1,41,$$

или

$$I_m = I \sqrt{2}.$$

Совершенно очевидно, что, кроме действующего значения силы тока, можно аналогично получить действующее значение э. д. с. или напряжения, если они изменяются по синусоидальному закону.

Действующее значение переменного тока принято обозначать буквой I , действующее значение э. д. с. — E и действующее значение напряжения — U . Действующее значение иногда называется *эффективным*.

Пример 26. Определить, чему равно действующее значение синусоидального тока, если его выразить через амплитуду того же тока.
Решение.

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

Пример 27. Действующее значение напряжения равно 210 в. Определить амплитуду этого напряжения.

Решение.

$$U_m = 1,41 U = 1,41 \cdot 210 = 296,1 \text{ в.}$$

Пример 28. По активному сопротивлению, величина которого равна 20 ом, проходит переменный ток в течение 3 мин и выделяет при этом 21 ккал тепла. Найти эффективное значение этого переменного тока.

Решение. Время прохождения тока по активному сопротивлению в секунду $60 \cdot 3 = 180 \text{ сек.}$

Количество тепла, выделенного током,

$$Q = 0,24 I^2 R t,$$

откуда

$$I = \sqrt{\frac{Q}{0,24 R t}} = \sqrt{\frac{21\,000}{0,24 \cdot 20 \cdot 180}} = 4,9 \text{ а.}$$

§ 62. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА, СОСТОЯЩЕГО ТОЛЬКО ИЗ АКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ИСТОЧНИКА Э. Д. С.

Такая цепь изображена на рис. 67. Если к цепи с активным сопротивлением приложено переменное напряжение, то действующее значение тока в ней можно определить по закону Ома:

$$I_a = \frac{U_a}{R}.$$

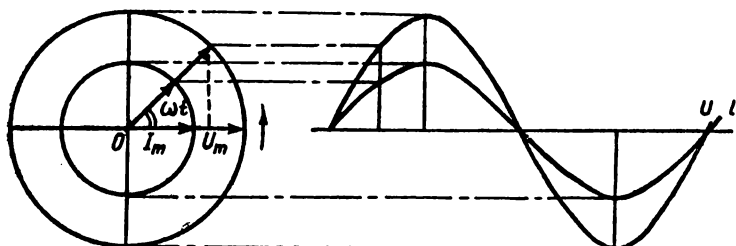


Рис. 68. Векторная диаграмма и синусоиды тока и напряжения для цепи, состоящей из активного сопротивления.

Взаимное расположение синусоид тока и напряжения для такой цепи изображено на рис. 68.

Из этого рисунка видно, что синусоиды тока и напряжения начинаются одновременно. Следовательно, в цепи переменного тока, содержащей активное сопротивление, ток и напряжение совпадают по фазе. *Среднее значение мощности для цепи, состоящей из активного сопротивления, равно произведению действующих значений тока и напряжения:*

$$P_a = IU.$$

Средняя мощность определяется за период и характеризует ту работу, которую может совершить переменный ток. Она называется также *активной мощностью*. Если речь идет о цепях переменного тока, то всегда, говоря о мощности, имеют в виду активную мощность.

Пример 29. В цепи с активным сопротивлением действующее значение напряжения равно 127 в, а сила тока 16 а. Найти активную мощность.

Решение. $P_a = IU = 16 \cdot 127 = 2032 \text{ вт.}$

Пример 30. Через активное сопротивление, равное 40 ом , протекает переменный ток, действующее значение которого 5 а . Найти активную мощность, затрачиваемую в этой цепи.

Решение. $P_{\text{а}} = I^2 R = 5^2 \cdot 40 = 1000\text{ вт}$.

§ 63. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА, СОСТОЯЩАЯ ТОЛЬКО ИЗ ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ИСТОЧНИКА Э. Д. С.

Такая цепь изображена на рис. 69. Если бы в этой цепи действовало постоянное напряжение, то ввиду того, что омическое сопротивление катушки, изображенной на рисунке, мало, в цепи протекал бы довольно значительный ток. Но при переменном токе в катушке появляется переменная э. д. с. самоиндукции. Эта э. д. с. будет влиять на силу тока. Следовательно, сила тока будет зависеть не только от внешнего напряжения, но и от э. д. с. самоиндукции.

В связи с этим в цепи, состоящей из одной индуктивности, между током и э. д. с. самоиндукции всегда наблюдается сдвиг фаз. Когда э. д. с. самоиндукции достигает своего наибольшего значения, сила тока равна нулю.

Мы уже знаем, что по закону Ленца э. д. с. самоиндукции всегда противодействует той причине, которая ее вызвала. Но э. д. с. самоиндукции возникает благодаря изменению силы тока. Следовательно, она противодействует изменению тока. Таким образом, э. д. с. самоиндукции, возникающая в катушке, противодействует приложенному напряжению. Это противодействие заключается прежде всего в том, что в цепи переменного тока, состоящей из одной катушки и имеющей активное сопротивление, равное нулю, возникает сопротивление, которое называют *индуктивным*. Индуктивное сопротивление появляется в цепи переменного тока вследствие того препятствия, которое возникает вследствие действия э. д. с. самоиндукции.

Если рассматривать изменения тока, э. д. с. самоиндукции и приложенного синусоидального напряжения, то в цепи переменного тока наблюдается следующая картина. Когда ток проходит через свое нулевое значение, э. д. с. самоиндукции в этот момент имеет наибольшее

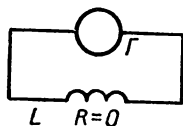


Рис. 69. Цепь переменного тока, состоящая из индуктивного сопротивления.

отрицательное значение, а приложенное напряжение — наибольшее положительное напряжение. В дальнейшем ток начинает возрастать, э. д. с. самоиндукции и приложенное напряжение уменьшаются по своей абсолютной величине, стремясь к нулю. В тот момент, когда э. д. с. самоиндукции и напряжение, приложенное к цепи, рав-

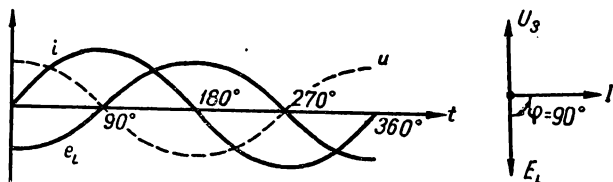


Рис. 70. Векторная диаграмма и синусоиды тока, напряжения и э. д. с. для индуктивной цепи.

ны нулю, ток имеет наибольшее значение положительного направления. В дальнейшем ток уменьшается, стремясь к нулю, две другие же рассматриваемые нами величины возрастают. При нулевом значении тока э. д. с. самоиндукции имеет наибольшее положительное значение, а внешнее напряжение — наибольшее отрицательное значение. Во вторую половину периода изменения всех трех величин идут в порядке, который определяется этими же закономерностями. Все изменения этих величин показаны на рис. 70.

Векторная диаграмма для цепи, состоящей из одной индуктивности, изображена на том же рисунке. Эта векторная диаграмма показывает, что ток в цепи с чистой индуктивностью отстает на 90° от напряжения, которое приложено к цепи, э. д. с. самоиндукции всегда направлена в сторону, противоположную внешнему приложенному напряжению. Таким образом, в рассматриваемой нами цепи между током и напряжением всегда имеется сдвиг фаз на угол 90° .

Ток, проходящий через индуктивность, равен напряжению, поделенному на произведение угловой частоты и коэффициента самоиндукции

$$I = \frac{U}{\omega L}.$$

Произведение ωL называется *индуктивным сопротивлением* и обозначается буквой X_L . Если ω взять в а, а

напряжение U в, то индуктивное сопротивление X_L получится в ом . Это индуктивное сопротивление зависит от частоты. С увеличением частоты переменного тока индуктивное сопротивление возрастает, так как $\omega = 2\pi f$.

Что касается мощности, то мгновенное значение ее и для этой цепи должно равняться произведению мгновенных значений напряжения и тока. Однако среднее значение мощности в цепи, состоящей из индуктивного сопротивления, равно нулю. Если изменение мощности изобразить графически, то получится синусоида, имеющая период в два раза меньший, чем период основного переменного тока. В первую четверть основного периода мощность будет иметь положительный знак, во вторую четверть — отрицательный. В следующую четверть снова наступит такое положение, при котором мощность будет иметь положительный знак и, наконец, в четвертой четверти знак опять изменится на обратный. Все эти изменения объясняются тем, что ток в цепи во второй и четвертой четвертях периода появляется не вследствие действия напряжения, приложенного к цепи, а вследствие действия возникающей э. д. с. самоиндукции. Если в первой и третьей четвертях периода энергия поступает в цепь от внешнего генератора, то во второй и четвертой четвертях энергия идет от катушки к генератору. Складывая положительные и отрицательные значения мощности за целый период, получим среднее значение мощности, равное нулю.

Пример 31. В цепи, состоящей из индуктивного сопротивления, протекает переменный ток, действующее значение которого равно 4 а . Частота тока 50 гц . Найти падение напряжения, если $L = 0,1 \text{ гн}$.

Решение. Индуктивное сопротивление цепи

$$X_L = \omega L = 2\pi f L = 6,28 \cdot 50 \cdot 0,1 = 31,4 \text{ ом}.$$

Падение напряжения

$$U = X_L I = 31,4 \cdot 4 = 125,6 \text{ в}.$$

Пример 32. Вычислить величину индуктивного сопротивления, если $L = 0,1 \text{ гн}$, а частота имеет следующие значения: 50 гц , 100 гц , 1000 гц .

Решение. Для первого случая

$$X_L = 2\pi fL = 6,28 \cdot 50 \cdot 0,1 = 31,4 \text{ ом};$$

для второго случая

$$X_L = 6,28 \cdot 100 \cdot 0,1 = 62,8 \text{ ом};$$

для третьего случая

$$X_L = 6,28 \cdot 1000 \cdot 0,1 = 628 \text{ ом}.$$

§ 64. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА, СОСТОЯЩАЯ ТОЛЬКО ИЗ КОНДЕНСАТОРОВ

Для постоянного тока конденсатор является непреодолимым препятствием. Однако переменный ток может проходить в цепи с конденсатором. Цепь переменного

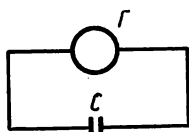


Рис. 71. Цепь переменного тока, состоящая из конденсатора.

тока, состоящая из одного конденсатора, изображена на рис. 71. Если к такой цепи приложено переменное напряжение, конденсатор будет все время заряжаться и разряжаться вследствие того, что напряжение на его обкладках изменяется как по величине, так и по направлению. Следовательно, в цепи все время будет протекать ток.

В первую четверть периода происходит заряд конденсатора до тех пор, пока напряжение на его обкладках не достигнет значения, равного наибольшему напряжению генератора. При этом на одной из обкладок будут накапливаться заряды положительного знака, а на другой — отрицательного, как это показано на рис. 72. Во второй четверти периода величина напряжения начнет уменьшаться и конденсатор будет разряжаться через генератор. В третьей четверти периода снова начинается возрастание напряжения, но только другого знака, при этом конденсатор будет заряжаться в направлении, противоположном первоначальному. Это происходит потому, что ток, заряжающий конденсатор, изменил свое направление. В четвертой четверти периода конденсатор разряжается так же, как и во второй четверти. Если изменение тока в цепи с конденсатором сопоставить с изменениями напряжения на обкладках конденсатора, то можно убедиться, что наибольшее значение тока и наибольшее напряжение не совпадают по фазе.

В конце первой четверти периода напряжение на конденсаторе растет все медленнее и медленнее, поэтому зарядный ток уменьшается и становится равным нулю, когда напряжение доходит до максимума. При разрядке конденсатора напряжение уменьшается, а ток растет в

Первая четверть периода

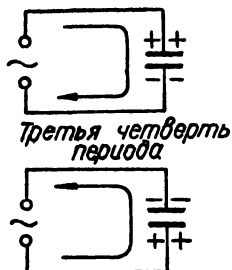
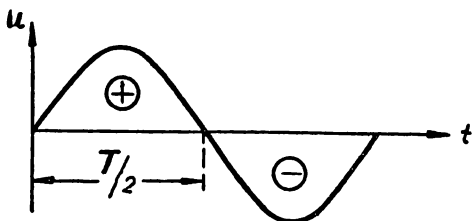


Рис. 72. Прохождение переменного тока через конденсатор.



обратном направлении и достигает наибольшего значения, когда напряжение равно нулю. Во второй половине периода картина изменения тока и напряжения протекает аналогично, но только в другом направлении.

Таким образом, в цепи с конденсатором между током и напряжением имеется сдвиг фаз на 90° . Но если в цепи с индуктивностью напряжение опережало ток на 90° , то в цепи с конденсатором оно отстает от тока на 90° .

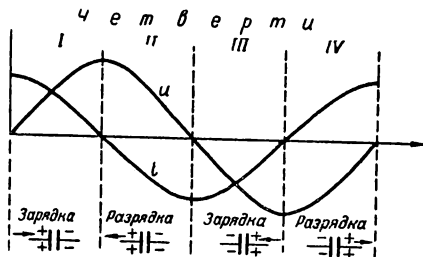


Рис. 73. Синусоиды тока и напряжения для цепи, состоящей из конденсатора.

Закон Ома в цепи с конденсатором может быть выведен из соотношения, которое связывает ток и напряжение. Сила тока в этой цепи возрастает с увеличением напряжения, но, кроме того, она зависит от емкости конденсатора и частоты переменного тока. Чем больше ем-

кость конденсатора и чем больше частота тока, тем больше сила тока.

Произведение емкости конденсатора на угловую частоту называется его *проводимостью*. Емкостное сопротивление, которое оказывает конденсатор переменному току, равно величине, обратной проводимости. Емкостное сопротивление

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}.$$

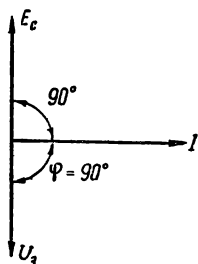


Рис. 74. Векторная диаграмма для цепи переменного тока, состоящей из конденсатора.

Зная, чему равно емкостное сопротивление в цепи с конденсатором, нетрудно сформулировать закон Ома для этого случая. Сила тока в цепи с конденсатором равна напряжению, которое надо разделить на емкостное сопротивление.

$$I = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}}.$$

Взаимное расположение синусоид тока и напряжения для цепи с емкостью показано на рис. 73, а векторная диаграмма для той же цепи изображена на рис. 74. Из этой диаграммы видно, что вектор напряжения на обкладках конденсатора отстает от вектора тока на 90° и в то же время равен по величине и противоположен вектору э. д. с. источника переменного тока.

Таким образом, напряжение, которое образуется на обкладках конденсатора, когда он включен в цепь переменного тока, является причиной возникновения дополнительного емкостного сопротивления и вызывает расхождение фаз между током и приложенным напряжением.

Из формулы для определения величины емкостного сопротивления видно, что оно уменьшается с увеличением частоты и емкости.

Средняя мощность в такой цепи, как и в цепи с индуктивностью, равна нулю. В цепи с конденсатором нет перехода электрической энергии в теп-

ловую, для такой цепи можно говорить только о *реактивной мощности*.

Пример 33. Определить емкостное сопротивление конденсатора, если емкость его равна 5 мкф, частота переменного тока — 50 гц.

Решение. Емкостное сопротивление конденсатора

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{6,28 \cdot 50 \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 636 \text{ ом.}$$

Пример 34. Определить, какой ток пройдет через конденсатор емкостью 10 мкф при напряжении 127 в, если частота равна 500 гц.

Решение.

$$I = U : \frac{1}{2\pi fC} = 127 : \frac{1}{6,28 \cdot 500 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 4 \text{ а.}$$

§ 65. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА, СОСТОЯЩАЯ ИЗ АКТИВНОГО И ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЙ

Цепь, имеющая индуктивное и активное сопротивление, изображена на рис. 75. Здесь активное сопротивление и индуктивность включены последовательно, поэтому во всей цепи должен протекать один и тот же ток.

Напряжение на активном сопротивлении цепи

$$U_a = IR.$$

Вектор этого напряжения должен совпадать по направлению с вектором тока. Так как в активной цепи между током и напряжением нет сдвига фаз, он направлен так, как показано на рис. 76.

На индуктивности напряжение

$$U_L = IX_L :$$

Это напряжение называют *индуктивным* или *реактивным*. Индуктивное напряжение на векторной диаграмме изображается вектором, который составляет с вектором тока угол 90° и опережает его по фазе.

Общее падение напряжения во всей цепи должно равняться сумме напряжений U_a и U_L . Так как эти напряжения находятся всегда в разных фазах, то их векторы складываются геометрически. Геометрическая сумма векторов активного и индуктивного напряжений на диаграмме будет представлена гипотенузой треугольника *Оаб*.

Таким образом, вектор напряжения, приложенного ко всей цепи, не будет совпадать с вектором тока. Между вектором напряжения и вектором тока образуется угол сдвига фаз, который на рисунке обозначен буквой φ .

В активно-индуктивной цепи полное напряжение U всегда опережает ток на угол φ . Это напряжение скла-

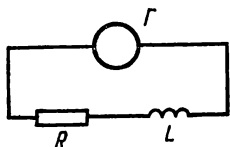


Рис. 75. Цепь переменного тока, состоящая из активного и индуктивного сопротивлений.

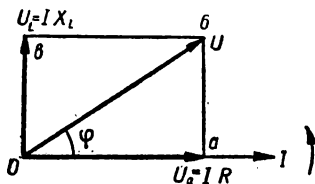


Рис. 76. Векторная диаграмма для цепи переменного тока, состоящей из активного и индуктивного сопротивлений.

дается из двух составляющих: U_a и U_L . Напряжение U является гипотенузой прямоугольного треугольника векторной диаграммы, а векторы U_a и U_L — его катетами. Между ними существует следующая зависимость:

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}.$$

Напряжение U_a называют *активной составляющей*, а напряжение U_L — *реактивной*. Активная и реактивная составляющие всегда сдвинуты между собой по фазе на угол 90° .

Из геометрии известно, что квадрат гипотенузы равен сумме квадратов катетов. Или

$$U^2 = U_a^2 + U_L^2.$$

Если выразить активную и реактивную составляющие напряжения через ток и соответствующие сопротивления, то получим

$$U^2 = I^2 (R^2 + X_L^2),$$

или

$$U = I \sqrt{R^2 + X_L^2}.$$

Определив из этого выражения силу тока, получим такую формулу:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}.$$

Выражение, находящееся в знаменателе этой дроби, называют *полным сопротивлением активно-индуктивной цепи*. Его обозначают буквой Z . Таким образом, полное сопротивление активно-индуктивной цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}.$$

Падение напряжения во всей цепи равняется произведению силы тока на полное сопротивление цепи

$$U = IZ.$$

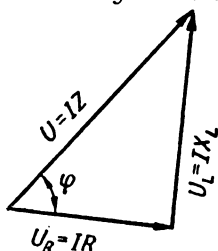


Рис. 77. Треугольник напряжений.

Очень часто векторную диаграмму электрической цепи вычерчивают, пропуская некоторые подробности.

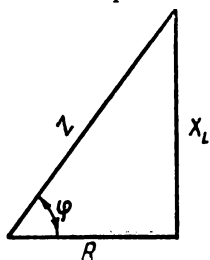


Рис. 78. Треугольник сопротивлений.

Диаграмма будет вполне понятна, если ее вертикальная и горизонтальная ось отсутствует на рисунке. Так, например, векторная диаграмма напряжений состоит только из векторов активного, реактивного и полного напряжений. Такая диаграмма имеет вид треугольника и называется *треугольником напряжений*. Если стороны этого прямоугольного треугольника разделить на силу тока I , то получатся отрезки, изображающие в определенном масштабе сопротивления R , X_L и Z . Они составляют треугольник сопротивлений. Треугольник напряжений изображен на рис. 77, а треугольник сопротивлений — на рис. 78.

Эти треугольники отличаются один от другого. Треугольник напряжений состоит из векторов, которые представляют собой изменяющиеся во времени синус-

соидальные величины. Надо помнить, что векторы напряжений мы условились рассматривать как векторы, вращающиеся против часовой стрелки с определенной угловой скоростью. Что касается сопротивлений, то совершенно очевидно, что они не могут изменяться во времени. Поэтому представление их в виде отрезков, соответствующих в определенном масштабе величинам этих сопротивлений, создает определенные удобства, но это не значит, что треугольник сопротивлений состоит из векторов такого же характера, как треугольник напряжений. Он только позволяет представить в удобном виде соотношение между сопротивлениями активно-индуктивной цепи.

Из треугольника сопротивлений можно определить угол сдвига фаз φ , т. е. угол, который образуется между напряжением, приложенным к цепи, и током. Косинус этого угла равняется отношению величины активного сопротивления R к полному сопротивлению Z . Таким образом,

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}.$$

Если цепь состоит из активного и реактивного сопротивлений, то и полную мощность, затрачиваемую в такой цепи, можно рассматривать как состоящую из двух частей: активной и реактивной. Активная мощность затрачивается в электрической цепи на преобразование электрической энергии в тепловую. Это преобразование происходит в активном сопротивлении. Реактивная мощность связана с индуктивным сопротивлением.

Активная мощность

$$P_a = U_a I = I^2 R.$$

Реактивная мощность может быть определена из следующих соотношений:

$$P_p = U_L I = I^2 \omega L.$$

Полная мощность цепи переменного тока может быть определена как произведение полного напряжения на силу тока

$$P = UI = I^2 Z.$$

Эту мощность также называют *кажущейся*.

Выше мы отметили, что только активная мощность является полезной, так как она определяет, какая часть

электрической энергии превращается в тепловую, механическую или световую энергию. Мы уже знаем, что реактивная мощность характеризует часть электрической энергии, получаемую от источника переменного тока потребителем и возвращаемую обратно из цепи к источнику тока. Таким образом, реактивная мощность не используется. Следовательно, потребителю электрической энергии всегда необходимо стремиться уменьшать потребление реактивной мощности.

Активная и реактивная мощности являются частями полной мощности. Полную, или кажущуюся, мощность можно вычислить через активную и реактивную мощности, пользуясь следующим соотношением:

$$P = \sqrt{P_a^2 + P_p^2}.$$

Полная мощность и ее составляющие части, представленные в виде отрезков, образуют треугольник мощности. Этот треугольник можно получить, если значения, соответствующие сторонам треугольника напряжений, умножить на силу тока. О соотношении между полезной активной и полной мощностью можно судить по коэффициенту мощности

$$K = \frac{P_a}{P_p} = \frac{I^2 R}{I^2 Z} = \frac{R}{Z}.$$

Активная мощность равна произведению полного напряжения, приложенного к цепи, тока в ней и коэффициента мощности

$$P_a = UI \cos \varphi.$$

Из этой формулы видно, что полезная активная мощность зависит от коэффициента мощности. Поэтому всегда надо стремиться к тому, чтобы коэффициент мощности $\cos \varphi$ был возможно большим. Из приводимых выше формул следует, что для цепей, состоящих только из индуктивного сопротивления или только из конденсатора, коэффициент мощности равен нулю, для цепи, в которой имеется только активное сопротивление, он равен единице.

Пример 35. Напряжение, приложенное к активно-индуктивной цепи, равно 220 в. Сила тока — 5 а, коэффициент мощности равен 0,5. Найти активную мощность.

Решение.

$$P_a = UI \cos \varphi = 220 \cdot 5 \cdot 0,5 = 550 \text{ вт.}$$

Пример 36. Кажущаяся мощность генератора равна 10 *кв*а. Найти полезную мощность, получаемую от этого генератора, если коэффициент мощности приемника равен 0,8 и 0,9.

Решение.

1) $P_a = P \cos \varphi = 10\,000 \cdot 0,8 = 8000 \text{ вт} = 8 \text{ квт};$

2) $P_a = 10\,000 \cdot 0,9 = 9000 \text{ вт} = 9 \text{ квт.}$

§ 66. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА, СОСТОЯЩАЯ ИЗ АКТИВНОГО И ЕМКОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЙ

Эта цепь изображена на рис. 79. Если в цепи последовательно соединены активное и емкостное сопротивления, то напряжение на активном сопротивлении можно определить по формуле

$$U_a = IR.$$

Напряжение на емкостном сопротивлении можно определить по формуле

$$U_C = IX_C.$$

Рис. 79. Цепь переменного тока, состоящая из активного и емкостного сопротивлений.

Реактивное напряжение на емкости должно отставать от тока на 90° . Поэтому треугольник напряжений для цепи, состоящей из активного и емкостного сопротивлений, должен быть построен так, как это показано на рис. 80. Треугольник сопротивлений для этой цепи изображен на рис. 81. Из треугольника напряжений следует, что квадрат полного напряжения, приложенного к цепи, должен равняться сумме квадратов активного и реактивного напряжений

$$U^2 = U_a^2 + U_C^2.$$

Отсюда

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_C^2} = I \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Закон Ома для цепи, состоящей из активного и емкостного сопротивлений, определяется следующим соотношением:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

Таким образом, полное сопротивление для рассматриваемого случая

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Между током и напряжением в этой цепи угол сдвига фаз может быть найден по его косинусу

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}.$$

Активная мощность цепи в этом случае

$$P_a = UI \cos \varphi.$$

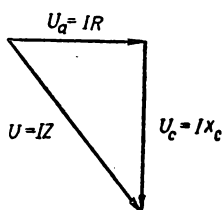


Рис. 80. Треугольник напряжений для цепи, состоящей из активного и емкостного сопротивлений.

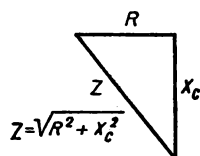


Рис. 81. Треугольник сопротивлений для цепи, состоящей из активного и емкостного сопротивлений.

Пример 37. В цепи включены последовательно активное сопротивление в 1100 ом и конденсатор емкостью 5 мкф, напряжение, приложенное ко всей цепи, 120 в, частота переменного тока 50 гц. Необходимо построить треугольник напряжений для этой цепи.

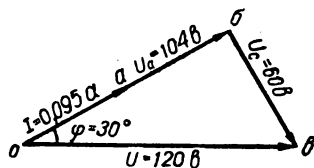


Рис. 82. Треугольник напряжений.

Решение. Чтобы построить треугольник напряжений, нам надо знать, чему равны напряжения на активном и емкостном сопротивлениях. Это можно определить, зная силу тока в цепи, полное ее сопротивление и емкостное сопротивление конденсатора.

Исходя из этих соображений, целесообразно установить следующий порядок решения задачи:

1) полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{(\omega C)^2}} = \sqrt{1100^2 + \frac{1}{(314 \cdot 5 \cdot 10^{-6})^2}} = 1270 \text{ ом};$$

2) сила тока в цепи

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{120}{1270} \cong 0,095 \text{ а};$$

3) напряжение на активном сопротивлении

$$U_a = IR = 0,095 \cdot 1100 = 104 \text{ в};$$

4) напряжение на емкостном сопротивлении

$$U_C = IX_C = \frac{0,095}{314 \cdot 5 \cdot 10^{-6}} = 60 \text{ в}.$$

Треугольник напряжений строится в определенном масштабе. Построение треугольника напряжений показано на рис. 82.

§ 67. ЦЕПЬ, СОСТОЯЩАЯ ИЗ АКТИВНОГО, ИНДУКТИВНОГО И ЕМКОСТНОГО СОПРОТИВЛЕНИЙ

Последовательное включение активного, индуктивного и емкостного сопротивлений показано на рис. 83. Пол-

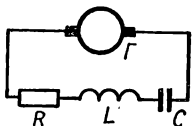


Рис. 83. Цепь, состоящая из активного, индуктивного и емкостного сопротивлений.

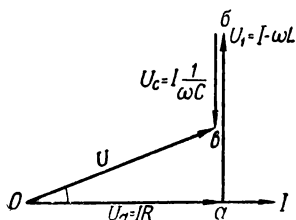


Рис. 84. Векторная диаграмма для цепи переменного тока, состоящей из активного, индуктивного и емкостного сопротивлений.

ное напряжение U в этой цепи состоит из напряжений на активном сопротивлении U_a , на индуктивном сопротивлении U_L и на емкостном U_C .

При построении векторной диаграммы напряжений для такой цепи могут быть два случая:

- 1) когда напряжение U_L больше U_C и
- 2) когда напряжение U_C больше U_L .

Рассмотрим случай, когда в цепи преобладает напряжение на индуктивном сопротивлении. Это соответствует положению, при котором индуктивное сопротивление больше емкостного.

Сначала в определенном масштабе отложим вектор протекающего в цепи тока. Активная составляющая напряжения будет представлена на диаграмме вектором, совпадающим по направлению с вектором тока. Построение диаграммы показано на рис. 84. Из конца вектора

активной составляющей напряжения надо построить перпендикулярно к нему вектор индуктивной составляющей напряжения. Затем, учитывая то, что вектор емкостной составляющей напряжения должен быть направлен по этой же линии, но только в противоположную сторону от вектора индуктивной составляющей напряжения, из конца вектора U_L откладываем вектор U_C так, чтобы конец этого последнего вектора был направлен не вверх, а вниз. Соединив точку O , стоящую в начале диаграммы, с точкой a , получим вектор полного напряжения, приложенного ко всей цепи.

Из образовавшегося треугольника напряжений Oab получим следующее соотношение:

$$U^2 = U_a^2 + (U_L - U_C)^2.$$

Выразив все фигурирующие в этом равенстве напряжения через ток и соответствующие значения сопротивлений, получим

$$U = I \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Откуда ток, протекающий в цепи,

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}.$$

Эта формула является математическим выражением закона Ома для цепи переменного тока, состоящей из активного, индуктивного и емкостного сопротивлений.

Полное сопротивление для такой цепи может быть определено из выражения

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

Треугольник сопротивлений для этой цепи изображен на рис. 85. Из треугольника сопротивлений можно получить формулу для определения коэффициента мощности «косинуса фи»

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}.$$

Определив, чему равен «косинус фи», нетрудно найти по соответствующим таблицам значение угла сдвига фаз между током и напряжением, т. е. угол φ .

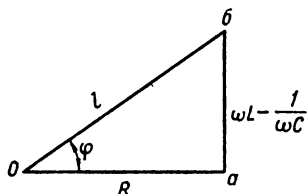
Активная мощность для цепи, состоящей из активного, индуктивного и емкостного сопротивлений,

$$P_a = UI \cos \varphi,$$

где U и I — действующие значения напряжения и тока.

Из треугольника сопротивлений видно, что величина коэффициента мощности — «косинуса фи» — зависит от соотношения между индуктивным и емкостным сопротивлениями. В том случае, когда индуктивное и емкостное сопротивления равны между собой, реактивное сопротивление, представляющее их разность, равно нулю. Угол сдвига фаз также равен нулю, а «косинус фи» равен единице.

Рис. 85. Треугольник сопротивлений для цепи, состоящей из активного, индуктивного и емкостного сопротивлений.



В этом случае говорят, что в цепи наблюдается резонанс.

Резонанс напряжений и резонанс токов.

Резонанс напряжений наблюдается, если сопротивления включены последовательно и индуктивное и емкостное сопротивления равны между собой. Реактивное сопротивление такой цепи равно нулю

$$X = X_L - X_C = 0.$$

Полное сопротивление такой цепи равняется активному сопротивлению

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

Так как при резонансе напряжений полное сопротивление цепи становится наименьшим из всех его возможных значений, то ток при этом будет наибольший. Таким образом, судить о том, наступил ли в цепи резонанс, можно по величине тока в цепи.

Ток при резонансе будет равняться отношению напряжения источника U к активному сопротивлению цепи R

$$I_{\text{рез}} = \frac{U}{R}.$$

Так как при резонансе индуктивное и емкостное сопротивления равны между собой, то индуктивная и емкостная составляющие напряжения на них также равны

$$I_{\text{рез}} X_L = I_{\text{рез}} X_C,$$

или

$$U_L = U_C.$$

Поэтому резонанс при последовательном соединении называется *резонансом напряжений*.

При резонансе напряжений может оказаться, что величина реактивных напряжений на индуктивности U_L и емкости U_C будет значительно больше, чем величина напряжения, приложенного ко всей цепи U .

Пример 38. Цепь переменного тока состоит из последовательно соединенных сопротивлений: активного, индуктивного и емкостного. Активное сопротивление равно 20 ом, индуктивное и емкостное сопротивления равны между собой. Коэффициент индуктивности катушки, включенной в цепь, равен 1 гн. Частота переменного тока — 50 гц. Напряжение, подводимое ко всей цепи, — 200 в. Найти величину напряжения на индуктивном и емкостном сопротивлениях при резонансе.

Решение. Резонансный ток

$$I_{\text{рез}} = \frac{U}{R} = \frac{200}{20} = 10 \text{ а.}$$

Индуктивное сопротивление катушки самоиндукции

$$X_L = 2\pi f L = 6,28 \cdot 50 \cdot 1 = 314 \text{ ом.}$$

Напряжения на емкостном и индуктивном сопротивлениях

$$U_L = U_C = I_{\text{рез}} \cdot X_L = 10 \cdot 314 = 3140 \text{ в.}$$

Резонанс токов наблюдается при параллельном включении индуктивных и емкостных сопротивлений. Такое включение показано на рис. 86.

Будем считать, что катушка самоиндукции и конденсатор не обладают активными сопротивлениями.

При резонансе индуктивное сопротивление цепи X_L равно емкостному X_C .

Так как при резонансе в параллельной цепи индуктивное сопротивление равно емкостному, то и токи, протекающие через них, равны между собой:

$$I_L = \frac{U}{X_L}, \quad I_C = \frac{U}{X_C},$$

или

$$I_L = I_C.$$

Поэтому резонанс при параллельном соединении называется *резонансом токов*.

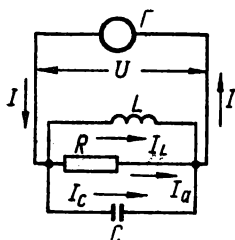


Рис. 86. Параллельные соединения катушки самоиндукции и конденсатора.

Так как индуктивная I_L и емкостная I_C составляющие токов противоположны по фазе, то по отношению к неразветвленной части цепи их векторная сумма будет равна нулю. Следовательно, ток в неразветвленной части цепи I не будет иметь реактивной составляющей. Ток I будет совпадать по фазе с напряжением U на зажимах генератора.

Амперметр, включенный в неразветвленном участке цепи, при резонансе токов будет показывать наименьшую силу тока.

При резонансе токов может оказаться, что реактивные токи, протекающие через индуктивность (I_C) и емкость (I_L), будут во много раз больше тока в неразветвленном участке параллельной цепи.

Частота, при которой наступает резонанс, называется *резонансной частотой*. Резонансная частота определяется из основного условия резонанса

$$\omega_p L = \frac{1}{\omega_p C},$$

откуда резонансная частота

$$f_p = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}.$$

Явления резонанса токов и напряжений весьма широко используются в современной электротехнике.

Многие устройства электрической связи основаны на явлениях резонанса. Резонанс используется при устройстве ламповых генераторов, электрических фильтров и

резонансных контуров. Очень широко резонанс применяется в радиотехнике.

В технике сильных токов явление резонанса используется для увеличения коэффициента мощности — «косинуса ϕ ».

«Косинус ϕ » увеличивается, если уменьшается угол сдвига фаз между током и напряжением. Для компенсации сдвига фаз применяется параллельное включение конденсатора с обмотками электродвигателей. При этом емкость конденсатора подбирается так, чтобы в цепи наступил резонанс токов.

ГЛАВА 4

ТРЕХФАЗНЫЙ ТОК

§ 68. ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОФАЗНЫХ СИСТЕМ

В современной электротехнике широко применяются многофазные системы переменного тока. Необходимо отметить, что промышленные установки однофазной системы имеют ограниченное применение.

Большинство современных электротехнических установок, применяющихся в промышленности, являются многофазными системами.

Многофазной системой переменного тока принято называть совместное действие нескольких электрических цепей переменного тока, в которых действуют электродвижущие силы одинаковой частоты. Существенной особенностью этих систем является то, что электрические фазы этих э. д. с. сдвинуты одна относительно другой на некоторый угол.

Отдельные цепи многофазной системы, в которых циркулируют токи одной и той же фазы, принято сокращенно называть просто фазой.

Таким образом, система из двух цепей называется *двухфазной*, из трех — *трехфазной*, из шести — *шестифазной*.

В настоящее время наибольшее распространение имеет трехфазный ток. Электрические двигатели мощных прокатных станов, подъемных и мостовых кранов, воздухоудовок, центрифуг, металлообрабатывающих, прядильных и ткацких станков, рудничных механизмов, машин, изготавливающих бумагу, и многих других устройств почти всегда бывают *трехфазной системы*.

§ 69. СПОСОБЫ ПОЛУЧЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Трехфазным током называют многофазную систему, которая состоит из трех однофазных токов одинаковой частоты. Эти токи протекают по трем проводам и сдвинуты по фазе один по отношению к другому на третью часть периода, т. е. на угол в 120° . Трехфазный ток полу-

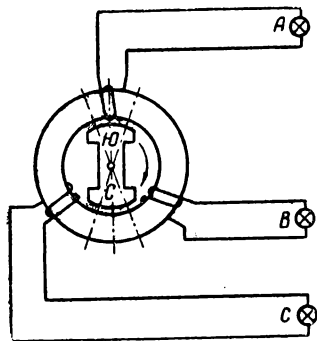


Рис. 87. Принципиальная схема трехфазного генератора.

чают от трехфазного генератора. Принципиальная схема трехфазного генератора показана на рис. 87. Неподвижная часть такого генератора называется *статором*, а вращающаяся — *ротором*. Ротор генератора имеет обмотку и является электромагнитом. Обмотка его называется обмоткой возбуждения. Постоянный ток, циркулирующий в обмотке возбуждения, намагничивает ротор, который становится электромагнитом с северным и южным полюсами. На статоре генера-

тора расположены три самостоятельные обмотки, которые смещены одна относительно другой на 120° .

Когда полюсы ротора поочередно проходят под обмотками статора, в них индуктируется э. д. с. Максимальные значения этих э. д. с. не могут возникать одновременно. Сначала максимума достигает э. д. с. в первой по порядку вращения ротора обмотке, затем во второй, и, наконец, в третьей. В каждой из обмоток э. д. с. изменяется по гармоническому закону, поэтому может быть представлена на рисунке в виде синусоиды. Но если в первой фазе амплитуда наступает в какое-то время, то во второй фазе амплитуда может наступить только после поворота ротора на 120° . В третьей фазе амплитудное значение э. д. с. наступит после поворота ротора еще на 120° . Все три синусоиды э. д. с., действующие в каждой фазе, можно изобразить на одном рисунке, как это сделано на рис. 88.

Три обмотки трехфазного генератора могут быть соединены между собой по той или иной схеме включения.

Различают два таких соединения обмоток: соединение звездой и соединение треугольником.

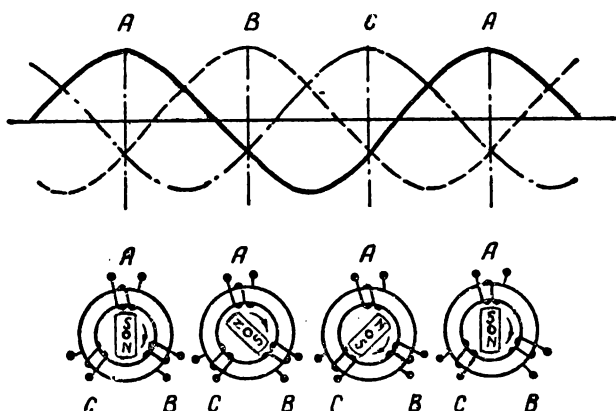


Рис. 88. Взаимное расположение синусоид э. д. с. трехфазного генератора.

Если амплитуды э. д. с. всех фаз генератора равны между собой, то такая система называется *симметричной*.

§ 70. СОЕДИНЕНИЕ ЗВЕЗДОЙ

Если фазы включаются звездой, то концы их соединяются в одну общую точку, которая называется *нейтральной*, или *нулевой*. Схема такого соединения обмоток генератора показана на рис. 89.

При соединении звездой в фазах генератора и в проводах, подключенных к зажимам генератора, циркулируют одни и те же токи, действующие величины которых равны между собой. Это совершенно очевидно из рассмотренной схемы соединения звездой, представленной в упрощенном виде на рис. 90. На этом рисунке

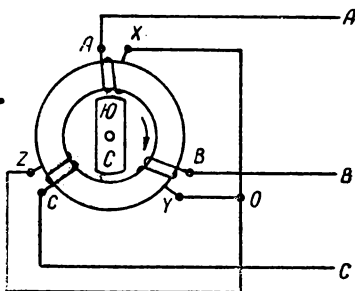


Рис. 89. Соединение звездой обмоток трехфазного генератора.

показана схема четырехпроводной системы. Один из проводов включен в нулевую точку системы и называется *нейтральным*, или *нулевым*. Такая четырехпроводная

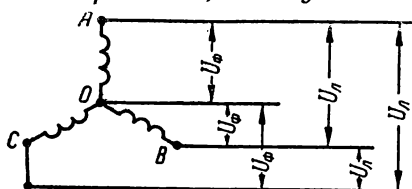


Рис. 90. Фазные и линейные напряжения при соединении звездой.

система применяется в том случае, если фазы нагружены неодинаково. При неравномерной нагрузке фаз на нейтральном проводе появляется ток, тогда как в случае равномерной нагрузки этого тока не будет.

Векторная диаграмма токов при равномерной нагрузке показана на рис. 91. С помощью этой же диаграммы можно убедиться в том, что если нагрузка равномерна, в нейтральном проводе действительно не может быть тока. Для этого достаточно выполнить геометрическое

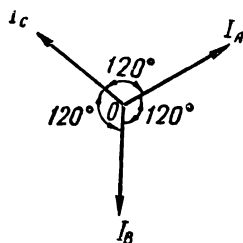


Рис. 91. Векторная диаграмма токов трехфазной системы при равномерной нагрузке.

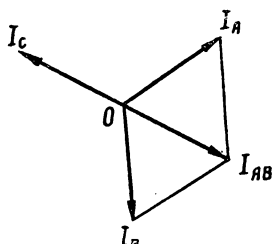


Рис. 92. Геометрическое сложение векторов токов трехфазной системы.

сложение векторов, которое показано на рис. 92. Вектор тока I_{AB} является суммой векторов I_A и I_B , но по величине он равен, а по направлению противоположен вектору I_C . Следовательно, геометрическая сумма всех трех векторов равна нулю. Если построить векторную диаграмму для случая, когда токи в фазах не одинаковы, сумма этих векторов не будет равна нулю.

В системах трехфазного тока принято различать линейные и фазные токи и напряжения. Те токи, которые циркулируют в линейных проводах, т. е. в проводах, соединяющих генератор с потребителем электрической

энергии, называют *линейными токами*. Токи, циркулирующие в фазных обмотках генератора или в одной из фаз потребителя, называют *фазными токами*. Линейные токи обозначают буквой $I_{\text{л}}$, а фазные — $I_{\text{ф}}$. Напряжения между линейными проводами называют *линейными напряжениями*. Их принято обозначать буквой $U_{\text{л}}$. Напряжение на концах какой-либо фазной обмотки генератора или на концах одной из фаз потребителя называется *фазным напряжением* и обозначается буквой $U_{\text{ф}}$. Фазные и линейные напряжения для схем соединения звездой показаны на рис. 90.

Из этой схемы видно, что при соединении звездой в случае равномерной нагрузки фаз фазные токи не только равны между собой, но и равны линейным токам. Таким образом, для соединения звездой имеем

$$I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}.$$

Из рисунка видно, что линейное напряжение при соединении звездой больше фазного. Между линейным и фазным напряжением в этом случае имеется следующее соотношение:

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}}.$$

При равномерной нагрузке фаз мощность трехфазной системы, соединенной звездой, определяется по формуле

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

Если в этой формуле фазное напряжение и фазный ток заменить линейными, то, учитывая соотношение между фазным и линейным напряжением, получим

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

Этой формулой можно пользоваться в том случае, когда даны не фазные, а линейные значения напряжения и тока. Как в одной, так и в другой формуле для определения мощности «косинус фи» является коэффициентом мощности каждой из фаз.

Пример 39. Фазное напряжение генератора, обмотки которого соединены звездой, равно 127 в, фазный ток — 10 а. Определить линейное напряжение и линейный ток.

Р е ш е н и е. Линейное напряжение

$$U_L = \sqrt{3} U_\phi = 1,73 \cdot 127 = 220 \text{ в.}$$

При соединении звездой линейный ток равен фазному

$$I_L = I_\phi = 10 \text{ а.}$$

Пример 40. Фазное напряжение трехфазного генератора равно 4000 в. Обмотки генератора соединены звездой и включены на нагрузку потребителя, фазы которого также включены звездой.

Полное сопротивление каждой из фаз потребителя — 40 ом.

Найти фазные и линейные токи, а также мощность, поглощаемую потребителем, если активное сопротивление каждой фазы потребителя — 32 ом.

Р е ш е н и е. Каждый из фазных токов

$$I_\phi = \frac{4000}{40} = 100 \text{ а.}$$

Фазные и линейные токи при соединении звездой равны между собой, поэтому

$$I_\phi = I_L = 100 \text{ а.}$$

Мощность, поглощаемая потребителем, может быть определена по формуле

$$P = 3 U_\phi I_\phi \cos \varphi = 3 \cdot 4000 \cdot 100 \cos \varphi.$$

Коэффициент мощности найдем из соотношения

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{32}{40} = 0,8.$$

Таким образом, мощность, потребляемая нагрузкой,

$$P = 3 \cdot 4000 \cdot 100 \cdot 0,8 = 960\,000 \text{ вт} = 960 \text{ кВт.}$$

§ 71. СОЕДИНЕНИЕ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Кроме соединения звездой, большое распространение в электротехнике трехфазных токов имеет соединение треугольником.

При соединении треугольником фазы включаются так, чтобы начало одной из них совпадало с концом другой. Линейные провода подключаются к вершинам образовавшегося из фаз треугольника. Соединение треугольником обмоток генератора показано на рис. 93. Упрощенная схема этого соединения изображена на рис. 94.

Из этих схем видно, что линейное напряжение между двумя линейными проводами при соединении треугольником равно фазному

$$U_L = U_\phi.$$

Это соотношение справедливо в том случае, когда фазы нагружены равномерно. Что касается фазных и линейных токов, то они при соединении треугольником не могут быть равны между собой, как это было в случае соединения звездой. Из рисунка 94 видно, что действующее значение каждого линейного тока в соответствии с первым законом Кирхгофа должно равняться сумме двух фазных токов (в данном случае речь идет о геометрической сумме векторов, изображающих эти токи).

Поэтому между линейными и фазными токами при соединении треугольником всегда будет иметь место соотношение

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}.$$

Эта формула справедлива тогда, когда нагрузка фаз равномерна.

Мощность трехфазного тока при равномерной нагрузке фаз и при соединении треугольником может быть определена по той же формуле, что и при соединении звездой

$$P = 3U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \cos \varphi,$$

или

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

Рис. 94. Фазные и линейные напряжения при соединении треугольником.

Для генераторов переменного тока соединение их обмоток треугольником возможно только при симметричной системе, т. е. тогда, когда сумма э. д. с. всех фаз равна нулю.

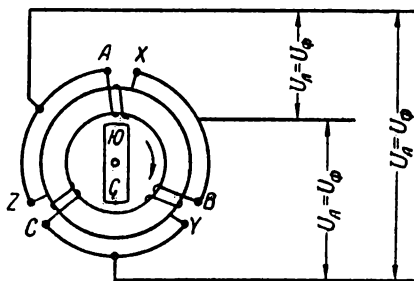
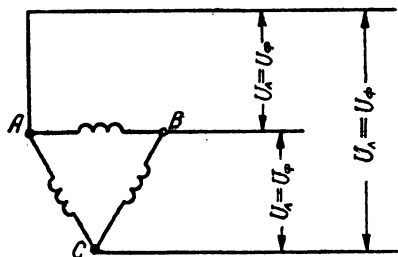


Рис. 93. Соединение обмоток трехфазного генератора треугольником.



При несимметричной системе сумма мгновенных значений э. д. с. трех фаз генератора не будет равна нулю. В контуре обмоток генератора, соединенных треугольником, появится ток, который может вызвать повреждение обмоток.

Так как э. д. с. генераторов трехфазного тока не всегда имеет синусоидальную форму, то сумма мгновенных значений э. д. с. отдельных фаз не во всех случаях будет равна нулю. По этой причине соединение обмоток генератора треугольником встречается редко.

Пример 41. Фазы генератора соединены треугольником. Найти ток каждой фазы генератора, если каждый из линейных токов равен 20 а.

Решение. Фазный ток

$$I_{\phi} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{20}{1,73} = 11,5 \text{ а.}$$

Пример 42. Обмотки генератора соединены треугольником. Фазное напряжение генератора — 127 в, фазные токи в обмотках равны 12 а. Найти линейные напряжения и линейные токи при равномерной нагрузке.

Решение. Так как при соединении треугольником фазное напряжение равно линейному, то

$$U_{\text{л}} = U_{\phi} = 127 \text{ в.}$$

Линейный ток

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\phi} = 1,73 I_{\phi} = 1,73 \cdot 12 = 20,7 \text{ а.}$$

Пример 43. Найти мощность трехфазной системы, соединенной треугольником, если фазное напряжение равно 127 в, фазный ток — 10 а и коэффициент мощности — 0,8.

Решение. Мощность трехфазного тока

$$P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi = 3 \cdot 127 \cdot 10 \cdot 0,8 = 3048 \text{ вт.}$$

Пример 44. Линейное напряжение сети — 127 в. Каждый из линейных токов 10 а. Найти мощность, потребляемую приемником электрической энергии, если во всех трех фазах его включены лампы накаливания.

Решение. Если в фазах включены только лампы накаливания, то нагрузка представляет собой чисто активное сопротивление и при этом коэффициент мощности должен быть равен единице.

Мощность, потребляемая приемником электрической энергии,

$$P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi = 3 \cdot 127 \cdot 10 \cdot 1 = 2197 \text{ вт.}$$

ГЛАВА 1

ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

§ 72. МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПРОВОДНИКИ

Основными материалами, хорошо проводящими электричество, являются, как известно, металлы. К этой категории металлов могут быть отнесены медь, сталь, алюминий и другие.

Кроме проводников из чистых металлов, в электротехнике применяются также проводники из их сплавов. Сюда относятся бронза, никром, манганин, константан и некоторые другие.

Ниже приводятся краткие характеристики, физические и электротехнические свойства наиболее употребляемых в электротехнике металлов и их сплавов.

§ 73. МЕДЬ

Наиболее широкое применение в электротехнике имеет медь, которую используют в виде проволоки для проводов, в виде полос и лент для различных контактных устройств. Для электротехнических целей применяется чистая электролитическая медь. Содержание различных примесей допускается не более 0,1%. Дело в том, что даже незначительные примеси фосфора, железа, мышьяка и других веществ значительно повышают удельное сопротивление меди.

Механические свойства меди зависят от ее термической обработки. Если медь отжигать, она становится мягкой, поэтому при нагревах получают большие удлинения. Электропроводимость такой меди повышается.

Более прочной на разрыв является твердотянутая медь. Она имеет повышенное удельное сопротивление.

Для отожженной меди международным стандартом установлено удельное сопротивление 0,017241 при 20°.

§ 74. СТАЛЬ

Сталь является самым дешевым материалом для проводников. Она применяется в виде проволоки и различных фасонов полос. Механическая прочность стальной проволоки велика. Сопротивление ее на разрыв достигает 120 кг/мм² при удлинении 4%.

§ 75. АЛЮМИНИЙ

Алюминий характерен своей легкостью. Получают его путем электролиза из окиси алюминия. В электротехнике его применяют в виде проволоки, листов, шин, лент, фольги (для бумажных конденсаторов) и в других видах.

Алюминиевая проволока выпускается по стандарту твердой неотожженной и мягкой отожженной.

Электрическое сопротивление алюминия зависит от чистоты металла. От этого же зависит его устойчивость против коррозии. По этой причине для изготовления проводов годен только алюминий, в котором примеси составляют не более 0,5%. Для изготовления фольги содержания примесей допускается не более 0,3%.

Так как механическая прочность алюминиевых проводов невелика, применяются сталеалюминиевые провода. Они выпускаются нормальной и усиленной прочностью.

Плотность литого алюминия 2,64 г/см³. Плотность тянутого и вальцованного алюминия 2,70 г/см³.

§ 76. БРОНЗА

Бронза — это сплав меди с оловом, кадмием, фосфором. Состав фосфористой бронзы: олова 3—6% и фосфора 0,06—0,13%.

Оловянистая бронза содержит 0,15—0,5% олова, магниевая имеет 1% магния, а кадмиевая — до 1% кадмия. Кадмиевая бронза устойчива там, где приходится иметь дело с трением, поэтому ее используют для контактных

проводов. Фосфористая и бериллиевая бронза применяется для скользящих контактов, а также для изготовления пружин, проводящих ток.

§ 77. НИХРОМ

Нихром широко применяется для изготовления нагревательных приборов. Если нихром нагревать в воздухе, то он покрывается пленкой, которая предохраняет его от дальнейшего окисления. Однако эта пленка при чередующемся нагревании и охлаждении может повредиться. Это объясняется разными коэффициентами расширения нихрома и пленки. Нихром нельзя перегревать, так как он при этом становится хрупким. Это может привести к порче прибора. Если нихромовая пленка покрыта оксидной пленкой, ее можно наматывать вплотную. В этом случае напряжение между витками не должно быть более половины вольта.

При температуре 20° прочность нихрома 70 кг/мм^2 , при 0° — 27 кг/мм^2 , а при 1000° только 4 кг/мм^2 . Температура плавления нихрома 1375° . В электротехнике нихром применяется в виде лент, листов и проволоки различных диаметров.

§ 78. МАНГАНИН

Манганин — это сплав меди с марганцем. Название его происходит от латинского слова «манганум», что значит марганец. Манганин применяется для различного рода сопротивлений, а также для эталонов, которые служат образцами сопротивлений.

Манганин имеет желтый цвет, температура плавления его 960° . Прочность манганина на разрыв равна 42 кг/мм^2 , удлинение при разрыве 30%.

Если манганин применяется вместе с медью в термопаре, его термоэлектродвижущая сила равна $0,9$ — 2 мкВ на 1° . Сопротивления из манганина не должны перегреваться выше 60° .

§ 79. КОНСТАНТАН

Константан имеет очень малый температурный коэффициент сопротивления. Название «константан» происхо-

дит от латинского слова «константа», т. е. постоянная величина. Константан имеет прочность на разрыв 40—60 кг/мм², удлинение при разрыве 28%. Температура плавления его 1270°.

Константан широко применяется для изготовления термопар, так как в паре с медью и с другими металлами создается электродвижущая сила 30—40 мкв на 1°.

В электротехнике константан применяют в виде проволоки диаметром от 0,03 мм и выше или в виде лент сечением от 0,1×4 мм и выше.

§ 80. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УГОЛЬ

К проводящим неметаллическим веществам, широко применяемым в электротехнике, относится уголь. Из электротехнического угля изготавливаются щетки электрических машин, электроды электропечей, электролитических ванн и гальванических элементов.

Его применяют для изготовления микрофонных порошков, мембран, реостатов и для других целей.

Большинство электроугольных изделий изготавливают из графита, сажи, аморфного угля. Связывающим веществом служит каменноугольная смола или каменно-угольный пек.

Электрощетки в соответствии с составом массы, из которой они изготовлены, бывают угольно-графитные, графитные, графитно-медные, бронзо-графитные. Угольно-графитные щетки отличаются большой твердостью. Они имеют большое удельное сопротивление. Эти щетки применяют для коллекторов машин постоянного тока при напряжении 220 в и выше, а также при переменном токе при напряжении 110—440 в.

ГЛАВА 2

ИЗОЛИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

§ 81. ТВЕРДЫЕ ИЗОЛИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ

Изолирующие материалы бывают твердые, жидкие и газообразные. Твердые диэлектрики весьма широко применяются в современной электротехнике для самых различных целей.

Одним из повсеместно распространенных материалов такого типа является дерево.

Весьма часто применяются для электротехнических целей минеральные диэлектрики: мрамор, слюда, асбест и другие. Широко распространены изоляционные изделия из стекла и керамики.

Для изготовления разнообразных электротехнических устройств и для монтажных работ всякого рода применяются органические волокнистые материалы, пластмассы, воскообразные вещества и лаки.

Ниже приводится краткое описание основных, наиболее часто встречающихся в практике твердых изолирующих материалов.

§ 82. ДЕРЕВО

Дерево в чистом виде, не обработанное специальными составами, широко применяется для изготовления различных конструкций и в меньшей степени как изоляционный материал. Дело в том, что дерево очень гигроскопично и хорошо поглощает влагу. Увеличение влажности дерева приводит к уменьшению механической прочности и ухудшению его изолирующих свойств.

Дерево состоит из ряда химических веществ: целлюлозы, смол, лигнина, жиров и большого количества воды.

Содержание воды в растущей древесине по весу в два с половиной раза превышает вес сухой ее основы.

Прочность дерева, если ее отнести к весу, значительно выше, чем у стали. Вдоль волокон древесина имеет механическую прочность в пять-шесть раз большую, чем в поперечном направлении.

Древесину для улучшения ее изоляционных свойств и уменьшения поглощения влаги пропитывают разными составами. Повышения изоляционных качеств добиваются, пропитывая дерево трансформаторным маслом, парафином, лаками, высыхающими маслами, смолами. Пропитка дерева трансформаторным маслом и парафином осуществляется провариванием его при температуре 120—125°. Перед пропиткой дерево просушивается. После пропитки древесина поглощает около 60% масла или же 80% парафина. Кроме улучшения изоляционных качеств, пропитка повышает влагостойкость древесины.

При пропитке дерева льняным маслом, олифой или масляными лаками деревянные изделия вынимают из пропиточного состава после охлаждения его до 60° . После пропитки изделия выдерживают в печи при температуре $110\text{—}130^{\circ}$, пока не произойдет полное запекание масла. Пропитка не только улучшает изоляционные свойства дерева, но и увеличивает его прочность.

§ 83. МРАМОР

Одним из наиболее широко применяемых в электротехнике минеральных диэлектриков является мрамор. Мрамор — это карбонатная порода, состав которой определяется химической формулой — CaCO_3 . Мрамор добывают в виде глыб и распиливают на доски разных размеров. Мраморные доски шлифуют и полируют. Мраморные доски применяют для силовых распределительных щитов, панелей предохранителей и рубильников. Серьезным недостатком мрамора является его значительная восприимчивость к влаге. В условиях повышенной влажности он резко снижает свои электрические качества. Это видно из сопоставления следующих данных: объемное удельное сопротивление сухого мрамора $10^{13} \text{ ом} \cdot \text{см}$, это же сопротивление после пребывания в течение 24 часов в условиях 97% относительной влажности снижается до $10^7 \text{ ом} \cdot \text{см}$.

При приемке мраморных досок выбоины и отколы допускаются только с обратной стороны их. Глубина этих дефектов для досок 1-го сорта должна быть не более 2 мм, для 2-го сорта не более 3 мм. Доски 3-го сорта и класса Б могут иметь изъяны на глубине 4 мм. Мраморные доски длиной меньше 0,5 м должны иметь стрелу прогиба не более 1 мм. Доски длиной от 0,5 до 1 м могут иметь стрелу прогиба не более 2 мм.

Для тех же целей, что и мрамор, применяется часто другой материал — шифер. Шифер представляет собой химически стойкий, глинистый сланец. Доски из шифера применяют только небольших размеров.

§ 84. СЛЮДА

Слюда — это минерал слоистого строения, применяется двух типов: мусковит, или калийная слюда, и флогопит, или калийно-магнезитовая слюда. В электротехнике

слюда применяется восьми основных номеров, которые определяются размерами пластин. Слюда добывают в виде кристаллов, которые впоследствии разделяют на пластины толщиной до 0,004 мм.

Слюда может свободно выдерживать нагрев до довольно высокой температуры. Мусковит можно нагревать до 400°, а флогопит — до 800°.

Слюда отличается большой гибкостью. Листок слюды можно свободно накручивать на стержень диаметром 3 мм, не опасаясь появления трещин.

Пробивная прочность слюды толщиной 0,05 мм при частоте 50 периодов составляет 2000 кВ/см; а при толщине 1 мм — только 500 кВ/см. Для напряжений высокой частоты эта прочность бывает не более 50 кВ/см.

Пробивная прочность слюды снижается, если на ней имеются пятна. Удельное объемное сопротивление чистого мусковита 10^{14} — 10^{15} ом·см; если же мусковит имеет темные пятна, удельное объемное сопротивление снижается до 10 — 10^8 ом·см.

В электротехнике слюда применяется как в виде целых пластинок, так и в виде миканита, получаемого склеиванием пластинок щипаной слюды.

В электротехнике слюда применяется для всевозможных изолирующих прокладок, шайб, пластин, как диэлектрик для конденсаторов и для других целей.

Конденсаторы с диэлектриком из слюды имеют значительную емкость на единицу объема и высокую пробивную прочность.

§ 85. АСБЕСТ

Асбест — это минерал, имеющий сложное строение. Имеется несколько разновидностей асбеста, но наиболее распространен кризотилловый. В мировой добыче асбеста кризотилловый асбест составляет 95% всего добываемого количества. В горных породах асбест встречается в виде жил, толщина которых бывает от долей миллиметра до нескольких сантиметров. Чем длиннее волокно асбеста, тем он дороже. Наиболее высокосортной является марка АА. К ней относится асбест с длиной волокна не менее 18 мм. Асбест различают по степени жесткости и разделяют его в этом отношении на три категории: жесткий, полужесткий и мягкий. Примеси железа в асбесте значительно снижают его качество.

Асбест отличается высокой устойчивостью при нагреве и хорошими электроизоляционными качествами. Недостатком асбеста является высокая его гигроскопичность.

Для электротехнических целей из асбеста изготавливают асбестовую изоляцию обмоточных проводов, бумагу, картон, текстильные и другие изделия.

Асбестовый текстиль имеет пробивную прочность 10 кВ/см при толщине 1,7—2 мм. Асбестовая лента выпускается толщиной 0,5—0,9 мм. Пробивная прочность ее 20 кВ/см. При ширине ленты в 15 мм ее разрывное усилие не менее 5 кг.

Асбестовая лента бывает железистая с содержанием железа до 7% и безжелезистая.

§ 86. СТЕКЛО

Стекло варят из песка, соды и мела. Оно состоит из кремнезема, окислов щелочных металлов, окислов щелочно-земельных металлов и других окислов. Если в состав стекла вводится алюминий, цинк, свинец, его свойство резко изменяется. Прибавление цинка увеличивает прочность стекла на разрыв, щелочные окислы увеличивают диэлектрические потери и т. д. Стекло различают боросиликатное, калиевое, натриево-свинцовое, натриево-кальциевое. Стекла делят на три группы. Первая группа — это щелочные стекла без тяжелых окислов или с незначительным их содержанием. Эта группа стекла идет на изготовление бутылок. Сюда же относятся оконные и зеркальные стекла. Ко второй группе относятся щелочные стекла с большим содержанием тяжелых окислов.

Третья группа — это бесщелочные стекла.

Удельное объемное сопротивление стекла первой и второй группы колеблется от $2 \cdot 10^8$ до $2 \cdot 10$ ом·см, а третьей группы — до $3 \cdot 10^{13}$ ом·см. Диэлектрическая проницаемость стекла первой группы 5—7, второй — 7—11 и третьей — 5—9. Основным недостатком стекол является их высокая хрупкость.

Стекло значительно теряет свои электротехнические качества при увеличении температуры и влажности.

Применяется стекло для изготовления стеклянного волокна. Стеклянное волокно по сравнению со стеклом имеет большую механическую прочность. Оно более

устойчиво при нагревании, чем хлопчатобумажное и шелковое волокно, и не менее гигроскопично.

§ 87. КЕРАМИКА

Из керамических изделий чаще всего в электротехнике применяется фарфор. В состав фарфора входят каолин, кварц, асбестовый шпат. При изготовлении фарфора эти вещества измельчают и перемешивают с водой. При этом образуется масса, из которой готовят различные электроизоляционные изделия отливкой или прессовкой. Изоляторы отливаются в гипсовых формах. При массовом выпуске мелких изделий их прессуют в стальных формах. Некоторые изделия больших размеров изготавливают обточкой болванок на вращающемся столе. Изделия из фарфора покрывают глазурью, которая придает керамике глянцевую поверхность и предохраняет от впитывания влаги. После этого изделия обжигают в печи при температуре 1350—1400°. Чтобы предохранить фарфор от непосредственного воздействия огня, изделия помещают в консоли из огнестойкой глины. При обжигании фарфор теряет воду, и происходит усадка. Величина усадки достигает 20%.

Механическая прочность фарфора возрастает при увеличении в составе массы количества кварца и полевого шпата, однако большое количество полевого шпата приводит к снижению электрических качеств.

Удельное объемное сопротивление фарфора — 10^{14} ом·см. Удельное поверхностное сопротивление при 90% относительной влажности — 10^8 ом, диэлектрическая проницаемость — 6. Пробивная напряженность при 50 периодах — 200—250 кВ/см.

Диэлектрические потери начинают заметно возрастать при температуре 80—100°.

В радиотехнике применяется радиофарфор, отличающийся улучшенными электрическими характеристиками и механическими качествами. При изготовлении радиофарфора в массу добавляют окись бария.

§ 88. ИЗОЛИРУЮЩИЕ ВЕЩЕСТВА ИЗ ПЛАСТМАСС

Пластическими массами называют материалы, состоящие из связывающего вещества и наполнителя.

В качестве наполнителя обычно применяется мел, тальк, мраморная мука, древесная мука, молотая слюда, асбестовое волокно и другие. По характеру связующего вещества пластмассы можно разделить на три основные категории. К первой категории относятся пластмассы на искусственных смолах, ко второй — на естественных смолах и к третьей — пластмассы на неорганическом связующем. Изделия из пластмасс получают прессованием под давлением. Для окраски пластмасс добавляются различные красители.

В электротехнике применяются различные пластмассы, наиболее распространенными из них являются текстолит, гетинакс, эбонит, полихлорвинил, гуттаперча и другие.

Г е т и н а к с — это пластмасса, изготовленная на искусственной смоле. Для ее изготовления слои бумаги пропитывают бакелитовой смолой, а затем прессуют в горячем виде. Гетинакс выпускается промышленностью в виде листов толщиной 1—50 мм и в виде трубок и цилиндров и применяется нескольких марок, имеющих свои особые качества. Гетинакс марки А имеет повышенную электрическую прочность, марки Б — повышенную механическую прочность и предназначен для работы на воздухе. Гетинакс марки В отличается низкими диэлектрическими потерями и применяется в телефонной и радиоаппаратуре.

Т е к с т о л и т представляет собой также слоистую пластмассу. Его получают горячей прессовкой слоев хлопчатобумажной ткани, пропитанной бакелитовой смолой. Текстолит выпускается марок А и Б. Текстолит марки А имеет повышенные электрические свойства и предназначается для работы в трансформаторном масле, а марки Б отличается повышенной механической прочностью и пригоден для работы на воздухе при температуре 105° и в трансформаторном масле до 90°.

Э б о н и т обычно изготавливается на синтетическом каучуке. Промышленность выпускает эбонит в листах различной толщины, в палках длиной до 1 м и диаметром до 75 мм, в трубках с внутренним диаметром 8—74 мм. Пробивная прочность эбонита 200—270 кв/см. Диэлектрическая проницаемость при 50 периодах — 3,2. Прочность эбонита на изгиб равна 760 кг/см². Удельное объемное сопротивление 10¹⁵ ом · см.

Полихлорвинил широко применяется для изоляции проводов и кабелей.

Полихлорвинил — это пластмасса, близкая по механической прочности и по внешнему виду к резине. Эта пластмасса получается в результате полимеризации хлорвинила с примесью наполнителя и мягчителя. Полихлорвинил не боится кислот, щелочей, бензина, трансформаторного масла. Его можно применять при температурах от -20° до $+65^{\circ}$. С повышением температуры его изолирующие качества значительно ухудшаются. Пробивная прочность 100—200 кВ/см.

Гуттаперча — это пластмасса на естественной смоле. Добывается она из деревьев и кустарников зондрандра, эукоммия и других. Гуттаперча имеет хорошие изолирующие качества и способность прекрасно сохраняться в воде. Она используется для изоляции подводных кабелей. На воздухе гуттаперча теряет свои качества и при температуре 37° становится мягкой.

§ 89. ПАРАФИН

Парафин — это воскообразное вещество. Такие вещества применяются в электротехнике для заливки конденсаторов, трансформаторов, а также для пропитки деталей и изделий.

Парафин добывают из нефти, смолы, бурого угля, торфа.

Полученный из нефти парафин лучше, чем из бурого угля.

При нагревании парафина до расплавленного состояния объем его увеличивается на 11—15%. Парафины бывают высокоочищенные, очищенные и неочищенные. Высокоочищенные парафины, оставленные на рассеянном дневном свете на семь дней, не желтеют. Их точка плавления $52-54^{\circ}$.

Неочищенные парафины имеют желтый цвет и точку плавления около 42° . Хороший парафин не должен иметь запаха, содержать кислот, щелочей и механических примесей.

§ 90. БИТУМЫ

Битумы — это продукты окисления нефти. Они бывают искусственные и естественные.

Искусственные битумы получают в результате продувания горячего воздуха через нефть или мазут. Естественные битумы или асфальты возникают при окислении нефти в природных условиях. Естественные битумы размягчаются при температуре 180—190°. Температура размягчения искусственных битумов колеблется в пределах 30—90°.

Удельное объемное сопротивление битумов при 20° — 10^{16} ом · см, при 80° — 10^{12} ом · см. Пробивная прочность 100—300 кв/см.

§ 91. ВОЛОКНИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ

К естественным волокнистым материалам принадлежат натуральный шелк, хлопок, джут и другие.

Волокнистые материалы отличаются прочностью, большой гибкостью, дешевизной. Их применяют в электротехнике в разных видах. Ткани и ленты используют при изолировании обмоток трансформаторов и электромашин.

В производстве кабелей и конденсаторов используют специальную бумагу. Для обмотки и оплетки проводов применяют пряжу. Картоны идут на изготовление прокладок, каркасов катушек.

Для улучшения изоляции ткани часто пропитывают лаками. Лакоткани идут на обмотки проводов, дросселей и др.

Временное сопротивление на разрыв лакотканей 1,2—5 кг/мм². Пробивная прочность при 50 гц для разных типов лакоткани находится в пределах 240—700 кв/см.

Для монтажных работ применяют липкие ленты прорезиненные и смоляные. Прорезиненная лента выпускается разной ширины и наматывается в круги диаметром 150 мм. Лента шириной 20 мм при диаметре круга 150 мм весит 350 г. Разрывное усилие этой ленты 4 кг на каждый сантиметр ширины.

Для изготовления смоляной ленты текстиль пропитывают битумом, к которому добавляют минеральное масло и немного канифоли. Пробивное напряжение такой ленты не менее 2500 в для одного слоя.

Изоляционная бумага изготавливается из целлюлозы тряпья и другого сырья. Кабельная бумага применяется для изоляции жил силовых кабелей и кабелей электро-

связи. Пробивная прочность ее 80—90 кВ/см. Для конденсаторной бумаги пробивное напряжение не менее 275 в при относительной влажности 65%.

§ 92. ЛАКИ

Электроизоляционные лаки получают растворением в специальных растворителях высыхающих масел, смол, сиккативов, пластификаторов и красителей. Растворителями служат спирт, бензин, бензол. Сиккативы способствуют более быстрому высыханию лаков, а пластификаторы придают лаковому слою пластичность. Основой многих лаков служит льняное масло. Из этого масла готовят олифу, переваривая масло с сиккативами. Благодаря этому олифа сохнет в десятки раз быстрее масла.

Весьма прочную лаковую пленку дают смолы, которые служат основой некоторых лаков. Одной из таких смол является шеллак.

Шеллак — это естественная смола, получаемая в виде чешуек из растений. Шеллак растворяется в этиловом спирте. Его электротехнические свойства следующие: удельное объемное сопротивление 10^{15} ом · см, диэлектрическая проницаемость 3—8, пробивная прочность 50—60 кВ/см.

Широко применяется для разных целей канифоль, получаемая в результате обработки смолы хвойных деревьев.

После удаления из смолы скипидара остается канифоль. Удельное объемное сопротивление канифоли 10^{15} — 10^{16} ом · см, диэлектрическая проницаемость 3,5. Канифоль бывает высшего (светлая), первого (желтая) и второго (темная) сортов.

Лаки различают пропиточные, покровные и клеящие.

Пропиточные и покровные лаки улучшают электрические свойства изделий. После того как лак высыхает, повышается пробивная прочность, теплопроводность, механическая прочность, уменьшается гигроскопичность изделий.

§ 93. СОСТОЯНИЕ И РАЗВИТИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ТЕХНИКИ

На протяжении многих лет основными материалами, широко применявшимися в электротехнике, были металлические проводники и изолирующие вещества. Однако в последние годы все более и более внедряются вещества, физические свойства которых не позволяют причислить их ни к одной из этих групп. Такими промежуточными материалами являются полупроводники.

Глубокое и внимательное исследование особенностей полупроводниковых веществ привело к открытию весьма интересных их свойств, неожиданных с точки зрения привычных представлений об электротехнических материалах. Эти свойства широко используются в современной технике.

В наше время полупроводники уже нашли широкое применение. С помощью устройств, в которых используются необыкновенные свойства полупроводников, можно генерировать радиоволны или усиливать токи высокой частоты. Можно также превращать переменный ток в постоянный. Полупроводники можно применять для регулирования тока и напряжения, измерения температуры и освещенности помещений. При помощи полупроводников на десятки километров можно передавать сигналы о наличии светящихся или излучающих тепло предметов.

Полупроводники превращают тепловую и звуковую энергию в электрическую. С помощью полупроводников получают тепло и холод, концентрируют электрическую и магнитную энергию и т. д.

В освоении полупроводников и применении их для различных целей современной техники еще далеко не все сделано. Научно-техническое предвидение позволяет предположить со всей реальностью, что в недалеком будущем полупроводниковые устройства вытеснят большую часть паровых машин и генераторов.

Полупроводники заменят электронные лампы в радиотехнике. Применение их в этой отрасли во много раз уменьшит стоимость и размеры приемников, телевизоров

и других устройств. Батареи из полупроводников будут превращать солнечную энергию в электрическую, что позволит широко использовать солнечный свет для технических и бытовых целей.

Полупроводниковые приборы позволяют сравнительно легко и просто осуществлять автоматизацию производственных предприятий и управление машинами на расстоянии. Энергия радиоактивных излучений будет при помощи полупроводников превращаться в электрическую.

Таково современное состояние и большие перспективы применения полупроводниковой техники.

§ 94. СВОЙСТВА ПОЛУПРОВОДНИКОВ

При охлаждении жидкого вещества силы взаимной связи между молекулами возрастают и жидкость начинает кристаллизоваться. Так, например, при охлаждении воды она превращается в лед, который имеет кристаллическое строение.

Процесс образования кристаллов заключается в том, что атомы вещества располагаются в определенном порядке. При этом совокупность атомов образует так называемую кристаллическую решетку.

Однако только у части твердых веществ кристаллическая решетка состоит из атомов. Если вещество является химически сложным, то кристаллическая решетка образуется из ионов. Примером может служить каменная соль или сахар.

В металлах при образовании кристаллов часть электронов легко отделяется от атомов.

Эти электроны называются свободными и принадлежат всему кристаллу, а не отдельным атомам. Они образуют так называемый «электронный газ» и заполняют все пространство металла. Наличие «электронного газа» в металле может быть продемонстрировано на следующем опыте. Кусок алюминия (или другого металла) поместим в электрическом поле между положительным и отрицательным электродами. При этом электроны устремятся к положительному электроду, т. е. в алюминии образуется электрический ток. Если в электрическое поле поместить кусок серы, то никакого тока в сере не будет. Дело в том, что в кристаллической решетке серы

электроны атомов прочно связаны с атомами, т. е. сера не имеет свободных электронов.

Частицы, образующие кристалл, располагаются так, что получается правильная, закономерно построенная пространственная решетка. Частицы находятся в узлах этой пространственной решетки. Если такое кристаллическое тело нагревать, то тепловое движение частиц будет заключаться в колебании частиц возле узлов решетки. Таким образом, узлы являются центрами колеба-

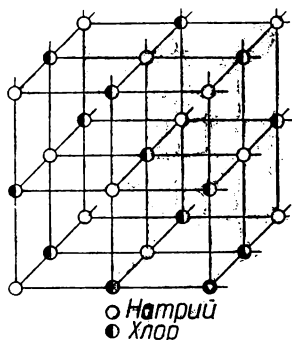


Рис. 95. Кристаллическая решетка каменной соли.

тельного движения частиц, которые как бы привязаны к узлам пространственной решетки.

В соответствии с тем, что представляют собой частицы, образующие кристалл, могут быть атомные, ионные или молекулярные решетки.

Одной из наиболее типичных является кристаллическая решетка каменной соли. Она состоит из ионов натрия и хлора и изображена на рис. 95.

Для каждого кристалла структура решетки и его форма зависят от сил взаимодействия между частицами, ее образующими.

Частицы стремятся расположиться так, чтобы наступило устойчивое равновесие между силами взаимодействия. Это значит, что порядок построения кристалла определяется тем положением, при котором потенциальная энергия внутри его будет минимальной. При этом частицы будут уложены наиболее плотно и рационально.

Поведение электронов в кристаллах становится понятным, если разобраться, как ведут себя электроны в отдельных атомах, образующих кристалл. Электрон может быть в нормальном или возбужденном состоянии.

Электроны в атомах имеют строго определенное количество энергии. В нормальном состоянии электрон содержит наименьшую величину энергии из всех возможных для атома значений. Если извне электрону сообщить дополнительную энергию в таком количестве, чтобы суммарная энергия атома и вновь полученная порция равнялись следующей допустимой границе энергии в атоме,

электрон перейдет в более высокое энергетическое состояние. В этом случае говорят, что атом возбужден и электрон находится в возбужденном состоянии.

Электрон может получить такую значительную порцию энергии, при которой он оторвется от атома. При этом происходит ионизация атома.

Электроны в атоме могут находиться только лишь на определенных энергетических уровнях. Они не могут быть в промежуточных между этими уровнями энергетических состояниях. Промежуточные уровни являются для них как бы «запрещенными зонами». Поэтому и приобретение электроном энергии, и потеря ее происходит не плавно, а скачками. При переходе электрона от одного энергетического уровня к другому выделяется или поглощается один квант света.

Опыт показывает, что свет поглощается и излучается не непрерывным потоком, а отдельными порциями, которые называют квантами или фотонами. Та отрасль науки, которая объясняет изложенные выше замечательные особенности света и электронов, называется квантовой теорией.

В кристаллах атомы располагаются в определенном порядке настолько близко один от другого, что поля их взаимодействуют между собой. В результате этого взаимодействия образуется периодическое электрическое поле. Ряд энергетических уровней электронов образуют полосы или энергетические зоны. Между этими зонами расположены области энергии, в которых электроны не могут находиться. Эти области называются запрещенными.

Строение энергетических зон любого твердого тела зависит от того, что мы имеем — металл, изолятор или полупроводник. Энергетическая структура спектра электронов изображена на рис. 96.

В металлах зоны могут перекрывать одна другую. В полупроводниках энергетические зоны располагаются так: вначале находится основная энергетическая зона 1,



Рис. 96. Энергетическая структура спектра электронов металла, полупроводника и изолятора.

затем запрещенная зона и над ней расположена свободная зона 2. Электропроводимость возникает в полупроводнике в том случае, если часть электронов переходит из основной зоны в свободную. Здесь эти электроны могут перемещаться под влиянием внешнего электрического поля.

Если такого перехода нет, то даже при наличии внешнего электрического поля электропроводимость появиться не может.

Следовательно, чтобы в полупроводнике возникла проводимость, надо электронам основной зоны сообщить извне некоторое количество энергии. Без затраты внешней энергии переход электронов на более высокие энергетические уровни невозможен.

С этой точки зрения становится понятным, что представляют собой изоляторы. У изолирующих веществ запрещенная зона имеет значительную величину.

Отсюда вытекает, что резкую границу между полупроводниками и изоляторами провести нельзя, если исходить из величины запрещенной зоны.

Основную энергетическую зону электронов в полупроводниках называют занятой или заполненной. Свободную зону называют также зоной проводимости.

§ 95. ЭЛЕКТРОННАЯ И ДЫРОЧНАЯ ПРОВОДИМОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Механизм электропроводимости полупроводников можно объяснить, исходя из энергетических зон электронов. Прежде всего уясним, откуда электрон может получить внешнюю энергию для перехода из основной зоны в зону проводимости.

Оказывается, что главным таким источником является тепло. С повышением температуры увеличивается число электронов проводимости. Но не только это влияет на электропроводимость полупроводника. Установлено, что весьма важную роль в этом отношении играют посторонние примеси в веществах полупроводника. Стоит добавить в полупроводник даже ничтожное количество примесей, и удельная электропроводность полупроводника может возрасти в миллионы раз. В этом случае примеси являются источниками электронов, попадающих в зону проводимости. Если примеси легко отдают электроны, то мы имеем электронную проводимость полупроводника.

Однако существуют и совершенно другие примеси. В отличие от примесей, легко отдающих электроны, они сами охотно поглощают их. Если из заполненной энергетической зоны полупроводника часть электронов уйдет в примеси, то оставшиеся там электроны получают возможность заполнить освободившиеся места. Ушедшие электроны освобождают часть энергетических уровней, и под действием приложенного извне электрического поля эти свободные уровни займут другие электроны. Частичный уход электронов из заполненной зоны полупроводника дает возможность перемещаться электронам, оставшимся в этой зоне. Механизм перемещения электронов в этом случае можно представить так: предположим, что с какого-то занятого энергетического уровня ушел один электрон и этот уровень стал свободным. Образовалась в системе энергетических уровней как бы дырка. В эту дырку тотчас же попадает соседний электрон. На его месте снова появляется дырка, которую заполнит какой-либо другой электрон. Этот процесс перемещения из дырки в дырку образует сплошную цепь движения электронов. Его принято называть дырочной проводимостью полупроводников.

Если полупроводник находится в электрическом поле, то электроны будут перемещаться от отрицательного полюса к положительному, дырки же — в обратном направлении, подобно пузырькам воздуха в воде, от теплого конца к холодному.

В использовании полупроводников для различных технических целей весьма существенное значение имеют примеси.

Важное значение имеет также надлежащее применение электронной и дырочной проводимости.

ГЛАВА 4

ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

§ 96. ВЫПРЯМИТЕЛИ

Полупроводниковые выпрямители впервые начали применяться в электротехнических установках в конце двадцатых годов текущего столетия.

Первоначально появились в эксплуатации купроксные выпрямители, затем селеновые и еще позже кремниевые и германиевые.

Купроксные выпрямители состоят из медных пластин со слоем закиси меди (Cu_2O). Если пропустить ток от закиси меди к медной пластинке, то электрическое сопротивление будет в тысячи раз меньше сопротивления, получаемого при прохождении тока от меди к медной закиси. Первое направление тока называется пропускным, или прямым, а второе — запорным, или обратным.

Слой закиси меди образуется на медной пластинке, если ее в течение нескольких минут нагревать до температуры 1060° . При этом на границе между медью и закисью ее появляется толщиной в доли микрона прослойка, выполняющая запорные функции. У закиси меди дырочная проводимость.

В настоящее время широко распространены селеновые выпрямители. Пластины этих выпрямителей обрабатываются следующим образом. Железную никелированную пластинку покрывают слоем селена, на который, в свою очередь, наносят электрод из сплава кадмия, олова и висмута. Выпрямляющие свойства такая пластина приобретает после продолжительного нагревания и пропускания тока.

Селен имеет дырочную проводимость. Выпрямление тока здесь происходит на границе между селеном и селенистым кадмием, образующимся в процессе обработки пластин. Селенистый кадмий обладает электронным механизмом проводимости.

Германиевые и кремниевые выпрямители получают введением соответствующих примесей. При этом образуются полупроводники с дырочной и электронной проводимостями. Так, например, путем обработки поверхности электронного германия создается тонкий слой дырочного германия. Этот слой называют p — n -границей, позволяющей получить необходимые для выпрямления условия.

Вообще хорошее выпрямление можно получить тогда, когда образуется контакт двух полупроводников, из которых один имеет дырочную проводимость, а другой — электронную. В выпрямителях такого рода запорный слой, оказываясь в электрическом поле переменного тока, как бы пульсирует, изменяя свою ширину. При этом сопротивление его резко меняется. Когда внешнее электрическое поле направлено от дырочного полупроводни-

ка к электронному, сопротивление заборного слоя уменьшается. Это соответствует пропусканню тока. Электроны и дырки перемещаются навстречу друг другу к границе раздела двух полупроводников.

Когда внешнее электрическое поле направлено от электронного полупроводника к дырочному, электроны и дырки удаляются от границы раздела. Это приводит к увеличению ширины заборного слоя и возрастанию его сопротивления.

Такое устройство выпрямляет переменный ток, если его включить в цепь переменного напряжения. В течение одного полупериода ток протекает через выпрямитель, второму полупериоду соответствует настолько слабый ток, что практически его можно считать равным нулю. Отношение тока, идущего в пропускном направлении, к току заборного направления называют коэффициентом выпрямления. Этот коэффициент характеризует выпрямляющие свойства системы. Лучшим считается тот выпрямитель, у которого коэффициент выпрямления больше и выше плотность тока, проходящего в пропускном направлении при каком-то определенном напряжении.

§ 97. ФОТОСОПРОТИВЛЕНИЯ

Переход электронов в свободное состояние или появление дырочной проводимости в полупроводниках может вызвать не только тепловая энергия, но и энергия излучения света. Оказывается, что количество энергии, которое передает световой луч отдельному электрону, зависит только от частоты световых колебаний и не зависит от яркости света. Если сила света увеличивается, то возрастает число электронов, поглощающих свет, а не энергия, которую каждый из них получает. Это обстоятельство свидетельствует о том, что световые волны — это потоки частиц. Световые частицы называются фотонами. Энергия каждого фотона равна произведению частоты световых колебаний на некоторый постоянный множитель. Этот множитель называют универсальной постоянной Планка и обозначают буквой h .

Если частоту колебаний света в секунду обозначить ν , то энергия фотона

$$E = h\nu.$$

Энергия фотона для желтого цвета равна двум электронвольтам. Это очень небольшая энергия, но и ее достаточно, чтобы в полупроводниках электроны перевести в свободное состояние и увеличить электропроводимость.

Чувствительность некоторых полупроводников к свету бывает настолько значительной, что они реагируют на инфракрасные лучи, частота колебаний которых меньше частоты колебаний видимого глазом спектра.

При помощи полупроводниковых устройств может быть обнаружено излучение слабо нагретых предметов, находящихся на расстоянии многих километров. Вызванное этим излучением незначительное увеличение величины тока может быть увеличено в миллион раз при помощи усилителей.

Энергия света не только переводит в свободное состояние электроны внутри полупроводников, но и может в некоторых случаях вызвать вылет электрона во внешнее пространство.

Повышение электропроводимости полупроводников под влиянием освещения называют фотопроводимостью или внутренним фотоэффектом.

В отличие от него явление выхода электронов в окружающее пространство называют внешним фотоэффектом.

Фотосопротивления в современной технике имеют разнообразное применение: в устройствах автоматики и сигнализации, для дистанционного управления, сортировки продукции, в звуковом кино и во многих других отраслях техники. При помощи фотосопротивлений можно автоматически регулировать освещенность и измерять силу света. Но не только лучи света могут влиять на электропроводимость полупроводников. Радиоактивные лучи, проходя через полупроводник, образуют в нем значительное количество свободных электронов. Иногда достаточно, чтобы через полупроводник прошла только одна радиоактивная частица, чтобы электропроводимость заметно изменилась. Такими чувствительными полупроводниками являются, например, сернистый кадмий и алмаз.

Пользуясь этими веществами, можно подсчитать, сколько радиоактивных частиц прошло через фокусирующее устройство.

§ 98. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ И ТРАНЗИСТОРЫ

В радиотехнике для детектирования поступающих в приемник сигналов в свое время применялись различные кристаллы: карборунд, галенит, цинкит и др.

Когда были изобретены электронные лампы, необходимость в применении кристаллических детекторов отпала. Электронные диоды с успехом заменили несовершенные и неудобные кристаллические устройства. Однако в последнее время снова стали применяться детекторы с кристаллами. Новые конструкции не имеют прежних недостатков и могут быть использованы при работе на сверхвысоких частотах. В кристаллических детекторах нового типа первоначально применяли кремний, а затем начали применять германий.

Германий по своим химическим свойствам близок к кремнию и углероду. Это химический элемент IV группы периодической системы элементов Д. И. Менделеева, атомный вес его 72,6, температура плавления 959° , удельный вес $5,4 \text{ г/см}^3$.

Электропроводимость германия может изменяться в широких пределах. Это изменение электропроводимости зависит от наличия примесей, которые введены в его кристаллическую решетку. Структура кристаллической решетки по своему типу похожа на решетку алмаза. Если добавить к германию такие вещества, как алюминий, бор, индий, электропроводимость его будет иметь дырочный характер. Добавление же ванадия, сурьмы, висмута и некоторых других элементов приводит к получению электронной проводимости. Пользуясь тем, что даже очень незначительные дозы примесей влияют на характер проводимости можно получить германий с необходимыми качествами.

Внешний вид и устройство точечного германиевого диода показаны на рис. 97.

Внутри керамического патрона 2 находится кристаллодержатель 4 с германиевой пластинкой 5. Контактная пружинка 6 закреплена в штырьке детектора 1. Кониче-

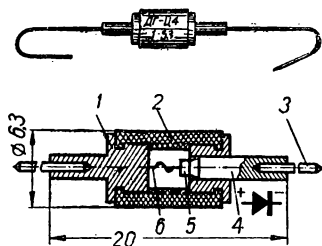


Рис. 97. Внешний вид и устройство германиевого диода.

ский конец контактной пружинки касается кристалла. Проволочные выводы 3 выходят из диода наружу. После сборки диода его формуют, посылая импульсы тока в пропускном направлении.

На рис. 98 изображена вольт-амперная характеристика германиевого диода. Из характеристики видно, что

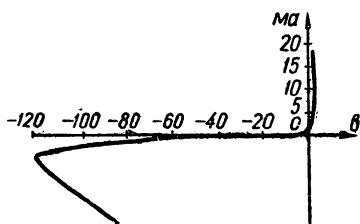


Рис. 98. Статическая вольт-амперная характеристика германиевого диода.

коэффициент выпрямления у такого диода очень большой. Включая германиевые диоды в схему, надо учитывать их полярность, указанную на патроне детектора.

Кристаллические диоды по сравнению с ламповыми имеют следующие преимущества: малые размеры, отсутствие накала, высокую механическую устойчивость, большой срок службы, линейную вольт-амперную ха-

рактеристику при низких напряжениях.

Более широко применяются диоды плоскостные. В плоскостных диодах в одном монокристаллическом германиевом кристалле образуется область дырочной электропроводимости и область электронной электропроводимости. Коэффициент полезного действия плоскостных диодов достигает 98%, а срок службы превышает 10 000 ч.

Кроме кристаллических диодов, в современной электротехнике широко применяются транзисторы.

Точечный транзистор состоит из германиевой или кремниевой пластинки и двух металлических контактных пружинки. Острия пружинки на расстоянии 50—250 мк соприкасаются с поверхностью пластинки.

Противоположная сторона пластинки покрыта металлом и припаяна к металлическому основанию. Внешними выводами служат контактные пружинки и металлическое основание. Эти выводы включаются в схему (рис. 99).

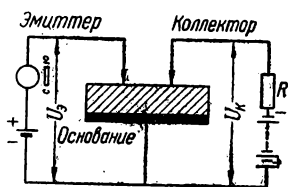


Рис. 99. Включение транзистора.

Одна из контактных пружин называется эмиттером, другая — коллектором.

Эмиттер вводит в германий «дырки», большая часть которых привлекается к коллектору. Коллектор находится под отрицательным напряжением и выполняет роль анода в электрической лампе. Нетрудно понять, что функции эмиттера по такой же аналогии соответствуют катоду.

Управляющим электродом служит база или металлическое основание транзистора. От потенциала базы относительно эмиттера зависит количество вводимых в германий носителей тока. Переменное напряжение, которое надо усилить, подводится к эмиттеру.

Напряжение после усиления получают на сопротивлении, включенном в цепь коллектора. При изменении напряжения U , соответственно будет изменяться и ток в цепи эмиттера. Это изменение тока повлечет за собой изменение тока в цепи коллектора.

Для точечных транзисторов коэффициент усиления по току обыкновенно равен 2—2,5.

Коэффициентом усиления по току называют отношение изменения тока коллектора к изменению тока эмиттера при заданном напряжении эмиттера.

Транзисторы имеют при малом входном сопротивлении сравнительно большое выходное сопротивление.

Это соотношение является следствием того, что эмиттер включается в пропускном направлении, а коллектор — в запирающем. Входным называется сопротивление транзистора между контактами эмиттера и базы при разомкнутом выходе. Выходное сопротивление — это сопротивление между контактами коллектора и базы при разомкнутом входе.

Точечные усилительные транзисторы могут работать на частотах до 10 Мгц.

Транзисторы подобно диодам, бывают как точечные, так и плоскостные. В плоскостных транзисторах тоже применяются монокристаллы германия. В этих кристаллах характер электропроводимости резко меняется в заданной области.

Плоскостные транзисторы мало отличаются по принципу действия от точечных, но по сравнению с последними имеют ряд преимуществ. Срок службы их больше точечных, а собственные шумы намного меньше. Отсут-

ствие точечных контактов увеличивает их механическую прочность. В плоскостных транзисторах большие контактные поверхности позволяют получить значительно большие выходные мощности. Плоскостные транзисторы могут работать в схемах включения с заземленной базой, эмиттером или коллектором. Точечные транзисторы работают устойчиво только при заземлении базы.

На рис. 100 показаны разрезы точечного и плоскостного транзисторов.

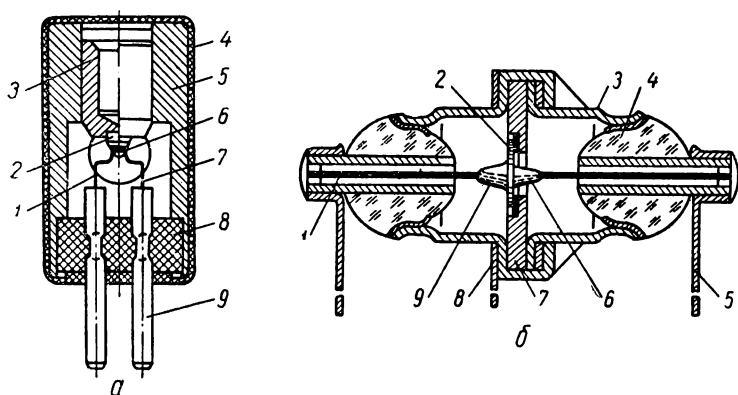


Рис. 100. Транзисторы в разрезе:

a — точечный: 1 — эмиттер, 2 — основание (германий), 3 — держатель, 4 — кожух, 5 — корпус, 6 — наполнитель, 7 — коллектор, 8 — втулка, 9 — вывод; *б* — плоскостный: 1 — вывод, 2 — основание (германий), 3 — корпус, 4 — изолятор стеклянный, 5 — вывод, 6 — эмиттер (индий), 7 — кристаллодержатель, 8 — вывод, 9 — коллектор (индий).

Кристаллические транзисторы имеют свои положительные качества и недостатки. Положительными их качествами являются высокая экономичность, долговечность, малые габариты и вес, высокая механическая прочность. К недостаткам относятся высокий уровень собственных шумов, большой разброс параметров, сравнительно низкие рабочие частоты, неустойчивая работа при температуре выше 70° .

В последнее время вместо германия для изготовления кристаллических транзисторов начали применять кремний. Это намного увеличивает устойчивость их при повышении температуры и дает возможность работать на более высоких частотах. Некоторые экземпляры кремние-

вых транзисторов устойчиво работают при температуре 150—175°. Применение в плоскостных транзисторах промежуточного слоя, не содержащего примесей германия, позволило увеличить рабочую частоту почти в десять раз.

§ 99. ФОТОЭЛЕМЕНТЫ

Электрический ток можно получить при помощи полупроводников без какого-либо внешнего источника энергии, используя непосредственно энергию света. Приборы, предназначенные для этой цели, называют фотоэлементами. Принцип устройства таких фотоэлементов заключается в следующем: между металлическим электродом и полупроводником образуют запорный слой и на поверхность полупроводника наносят тонкий слой металла.

Таким металлом может быть золото, слой которого настолько тонок, что пропускает лучи света. Энергия света при этом будет сообщаться электронам золота. Электроны освобождаются и переходят через запорный слой к металлическому электроду. Этому способствует образование разности потенциалов между электродом и полупроводником, которые отделены друг от друга изолирующим запорным слоем. Благодаря этой разности потенциалов в замкнутой цепи будет протекать электрический ток. Образование электроэнергии, конечно, происходит только тогда, когда на фотоэлемент попадают лучи света.

Частота света должна быть не меньше той, которая необходима для перехода электронов в свободное состояние в самом полупроводнике.

Металлические электроды фотоэлементов изготовлялись из окиси меди. Потом их стали изготовлять из селена. Чувствительность селеновых фотоэлементов к лучам света аналогична чувствительности человеческих глаз, поэтому селеновые элементы применяются и в настоящее время.

Советские физики Ю. П. Маслаковец и Б. Т. Коломиец создали фотоэлемент из сернистого талия, чувствительность которого весьма значительна. Этот фотоэлемент позволяет получить 10 000 мка на 1 лм. Люмен — это количество света, падающее на 1 м², когда источник света в одну свечу находится на расстоянии 1 м от освещаемой поверхности.

Хотя фотоэлементы с запорным слоем преобразуют

световую энергию в электрическую, коэффициент полезного действия их еще не велик. В последнее время появились фотоэлементы из кремния и германия, коэффициент полезного действия которых больше других фотоэлементов.

Применение полупроводниковых фотоэлементов в схемах телеуправления, автоматики, сигнализации создает большие удобства, так как при этом источники постоянного тока не нужны.

С прогрессом техники полупроводниковых элементов стало возможным решить вопрос по использованию энергии солнечного излучения для питания электроустановок. В последние годы появились солнечные батареи, причем эффективность некоторых из них достигает 11%. Солнечная батарея состоит из большого количества кремниевых фотоэлементов. Каждый из этих элементов может превращать солнечный свет непосредственно в электрическую энергию. Эффективность кремниевых фотоэлементов значительно выше эффективности других фотоэлементов такого же характера.

Кремниевые фотоэлементы состоят из пластинок химически чистого кремния, в который добавлены примеси других веществ для создания в кремнии двух слоев с электронной и дырочной проводимостями. На границе этих слоев образуется типичный для фотоэлементов запорный слой. В кремниевых фотоэлементах эффективная часть солнечной энергии поглощается слоем толщиной в одну тысячную дюйма. Кремний, обладающий электронной проводимостью, окружен оболочкой кремния с дырочной проводимостью. Каждый тип кремния имеет свой контактный вывод. Одним из методов получения тонкого слоя кремния с дырочной проводимостью является нагревание пластинки кристаллического кремния n -го типа до температуры 1400° (т. е. почти до температуры плавления кремния) в парах бора. При изготовлении кремниевых фотоэлементов необходимо создать надежный контакт с двумя типами кремния. Хороший результат получается при заливке кремниевой пластинки в прозрачную пластмассу. Эта пластмасса образует вблизи поверхности кремния подобие линзы, собирающей солнечные лучи.

На рис. 101 изображены три кривые, поясняющие работу кремниевого фотоэлемента. Кривая *A* показывает

распределение солнечной энергии при различной длине световых волн, попадающих на перпендикулярную поверхность, когда солнце находится в зените. Кривая *B* изображает распределение фотонов в этом излучении. Кривая *C* показывает короткозамкнутую спектральную характеристику кремниевого фотоэлемента. По оси абс-

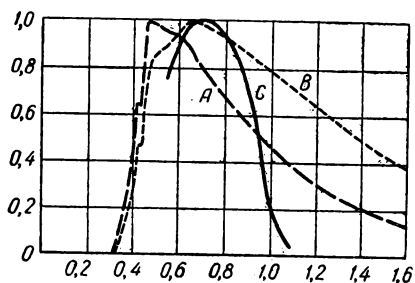


Рис. 101. Кривая, поясняющая работу кремниевого фотоэлемента.

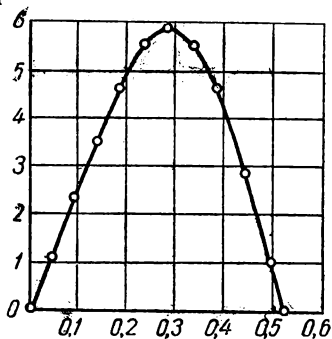


Рис. 102. Зависимость выходной мощности солнечного элемента от выходного напряжения.

цисс отложена длина волны в микронах, а по оси ординат — энергия в нормализованных единицах. Из рисунка видно, что максимальная спектральная чувствительность фотоэлемента совпадает с максимумом фотонов и лежит на границе видимой и инфракрасной частей спектра.

Такое соотношение приводит к тому, что выходное напряжение фотоэлемента изменяется лишь в небольших пределах при изменении условий освещенности. Легкие облака пропускают инфракрасные лучи, поэтому при незначительной облачности выходное напряжение фотоэлемента практически не изменяется.

На рис. 102 показана зависимость выходной мощности солнечного элемента от выходного напряжения в вольтах или от различных нагрузок. По горизонтальной оси откладывается выходное напряжение в вольтах (различная нагрузка), по вертикальной оси — выходная мощность в милливаттах на квадратный сантиметр.

Напряжение, при котором получается максимальная выходная мощность, остается постоянным при изменении освещенности. Поэтому кремниевые фотоэлементы в широкой полосе изменения освещенности являются хоро-

шим источником электроэнергии для таких нагрузок, как аккумуляторы, для зарядки которых необходимо напряжение неизменяющейся величины. В солнечной батарее нет движущихся частей, химической коррозии, поэтому срок службы ее практически не ограничен.

§ 100. ТЕРМОЭЛЕМЕНТЫ

Термоэлектричество было впервые открыто Зеебеком. Еще в 1822 г. Зеебек установил, что магнитная стрелка отклоняется, если ее поместить рядом с замкнутым контуром, составленным из двух разных металлических проводников, и если при этом места контактов имеют разную температуру. Воздействие на магнитную стрелку в этом случае связано с возникновением в замкнутом контуре электрического тока. Для нас это сейчас очевидно. Но в свое время сам Зеебек, открывший это явление, был против такого объяснения. Он был уверен в том, что отклонение стрелки связано с намагничиванием проводников. Во времена Зеебека нельзя было всерьез принимать описанное устройство как приспособление для прямого превращения тепла в электричество. Дело в том, что только несколько десятых долей процента теплоты превращалось в электроэнергию. Остальная часть тепловой энергии переходила от горячего конца металлического полупроводника к холодному.

С применением полупроводников описанное явление можно использовать более эффективно. В полупроводниках при повышении температуры кинетическая энергия электронов не остается неизменной, как в металлах. Она увеличивается пропорционально температуре, отсчитываемой от абсолютного нуля. Поэтому образование разности температур в полупроводнике приводит к перемещению свободных зарядов. На горячем конце полупроводника концентрация электронов или дырок больше и скорость их движения выше. Поэтому они переходят из горячего конца полупроводника в холодный в большем количестве, чем из холодного в горячий. В полупроводниках с электронной проводимостью электроны переходят в холодный конец, и он заряжается отрицательно. Горячий конец полупроводника, потерявший часть электронов, оказывается заряженным положительно.

Благодаря этому между горячим и холодным концами полупроводника возникает разность потенциалов. В по-

лупроводниках с дырочной проводимостью горячий конец заряжается отрицательно, а холодный — положительно. С увеличением разности потенциалов внутри полупроводника увеличивается электрическое поле. Это поле замедляет поток электронов от горячего конца к холодному и ускоряет его в противоположном направлении. По истечении некоторого времени между концами образуется разность потенциалов, при которой оба потока электронов становятся одинаковыми. Наступившее равновесие определит термоэлектродвижущую силу, возникающую в полупроводнике вследствие разной степени нагрева его концов. Эта электродвижущая сила в десятки раз больше, чем в парах, составленных из металлов.

Коэффициент полезного действия термоэлементов из полупроводников достигает 6—8%. Если вспомнить, что в паровозах использование топлива определяется 4—8%, то станет ясной экономическая ценность термоэлементов. Простота их устройства, отсутствие сложных вращающихся механизмов, малые размеры и устойчивость работы термоэлементов говорит о том, что они должны играть важную роль в энергетике.

В нашей стране термоэлементы нашли первое свое практическое применение для обеспечения электропитания радиоприемников в местах, где нет электроэнергии. Лаборатория полупроводников Академии Наук СССР совместно с Министерством связи СССР разработала термоэлектрические генераторы, выпускаемые нашей промышленностью.

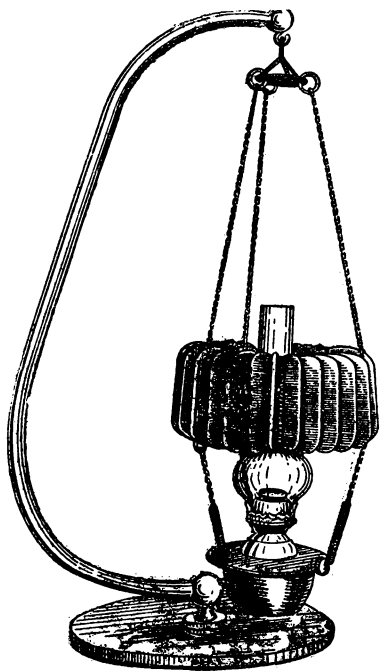


Рис. 103. Термоэлектрогенератор
ТГК-3.

В этих устройствах необходимое тепло обеспечивает керосиновая лампа. Горячие газы выходят из стекла лампы и подогревают внутренние спайки термоэлементов, которые расположены радиально вокруг стекла. Внешние спайки охлаждаются комнатным воздухом. Усиление охлаждения достигается при помощи пластин радиатора. Температура внутренних спаек $300\text{—}350^\circ$, внешних — 60° . Эта разность температур достаточна для получения электроэнергии, которая может обеспечить питание радиоприемника.

Одна часть термоэлектробатареи используется для питания катода, другая — для питания анода приемника. Термоэлектрогенератор ТК-3 показан на рис. 103.

§ 101. ХОЛОДИЛЬНИКИ

В 1838 г. в Петербурге академик Ленц осуществил один весьма интересный опыт. Два проводника из разных металлов были соединены между собой и включены в электрическую цепь. В месте соединения металлов Ленц поместил каплю воды. В течение некоторого времени через проводники пропускали ток, и капля воды превратилась в лед. Оказывается, что ток, появляющийся в замкнутом контуре термоэлемента, охлаждает ту спайку двух металлов, которая подогревается, и, наоборот, нагревает другую холодную спайку. При пропускании через термоэлемент тока, полученного от постороннего источника электроэнергии, в противоположном направлении у горячей спайки выделяется тепло, холодная спайка еще больше охлаждается. Это явление впервые наблюдал Пельтье еще в 1834 г.

Разность температур, которую можно получить, пользуясь явлением Пельтье, и количество тепла, отнятое у холодной спайки и сообщенное нагретому концу термоэлемента, характеризуется той же величиной, что и его коэффициент полезного действия.

Температуру нагреваемой спайки термоэлемента можно поддерживать на уровне комнатной температуры отводом излишков тепла, выделяемого в этом месте. Это позволит охладить другую спайку до довольно низкой температуры. Понижение температуры спайки будет, конечно, передаваться окружающему воздуху. Вполне понятно, что описанные явления можно использовать

для устройства холодильников. Такие холодильники по сравнению с другими существующими системами имеют такие важные преимущества: отсутствие движущихся устройств и простоту конструкции. Необходимо, однако, отметить, что коэффициент полезного действия холодильника на термоэлементах, или холодильный коэффициент, мог бы быть значительно выше, если бы не было переноса тепла и выделения тепла током в полупроводниковых элементах, составляющих батарею.

§ 102. ФЕРРИТЫ

В последнее время в электротехнике, и особенно в радиотехнике, все чаще применяются полупроводники особого типа, называемые ферритами. Ферриты — это соединение окислов трехвалентных металлов с двухвалентными. Для получения ферритов можно брать, например, окислы железа или алюминия (трехвалентные) и цинка (двухвалентный). Такие полупроводники имеют высокие магнитные качества и большое удельное сопротивление.

Как известно, с повышением частоты переменного тока значительно возрастают потери, связанные с появлением вихревых токов в железных сердечниках. Это приводит к тому, что в радиотехнике при очень высоких частотах применять железные сердечники нецелесообразно. Вследствие высоких магнитных качеств и больших удельных сопротивлений ферритов можно добиться значительных степеней намагничивания при частотах до миллиона герц и больше.

При помощи ферритов можно получить в небольших объемах значительную магнитную энергию при высокой частоте. Ферритовые сердечники дают возможность намного уменьшить размеры высокочастотных трансформаторов и других радиотехнических приборов.

§ 103. ТЕРМИСТОРЫ

Одной из основных особенностей полупроводников является резко выраженная зависимость их электропроводимости от изменения температуры. При увеличении температуры на 1° электропроводимость полупроводника возрастает на 3—6%. Повышение температуры на 100°

влечет за собой увеличение электропроводимости в 50 раз. Это свойство полупроводников позволяет использовать их для измерения температур. Термометры-сопротивления из полупроводников называют термисторами. Благодаря малым размерам термисторы очень быстро реагируют на изменение температуры. Это же свойство позволяет легко и просто измерять с их помощью температуру маленьких предметов. Изменение сопротивления полупроводников в десятки раз больше, чем металлов, если они находятся в одинаковых температурных условиях. Это намного повышает точность измерений при помощи полупроводников.

Но не только измерение температуры можно осуществить при помощи термисторов. Они могут служить ограничителями времени. Время, которое необходимо для достижения какой-либо величины тока при установленном напряжении, зависит от размеров теплового сопротивления, включенного в цепь, и от того, как оно охлаждается. Изменяя эти данные, можно добиться того, чтобы по нашему усмотрению это были доли секунды или минуты. Термисторы могут применяться для постепенного включения различных электрических устройств автоматическим путем. Скорость включения может быть заранее предусмотрена.

Тепловые сопротивления применяют также для уменьшения колебаний напряжения или величины тока.

§ 104. ПРИНЦИП РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электрические машины, с помощью которых механическая энергия преобразуется в электрическую, называются *генераторами*. Если генератор служит для создания постоянного тока во внешней цепи, подключаемой к нему, то он называется *генератором постоянного тока*.

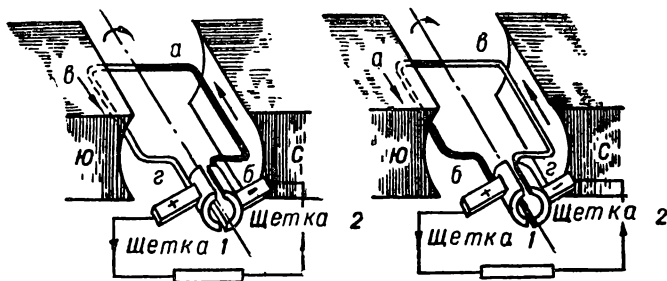


Рис. 104. Принцип действия генератора постоянного тока.

Принципиальное устройство такого генератора показано на рис. 104. Основные части генератора постоянного тока следующие:

а) **электромагниты**. Электромагниты служат для создания магнитного поля. Систему электромагнитов называют также *индуктором* машины. Она состоит обычно из *станины* машины, имеющей кольцевую форму, внутри которой укреплены *сердечники* электромагнитов индуктора с катушками. Электромагниты привинчиваются к станине машины и размещаются внутри ее так, чтобы

полюсы их чередовались, как это показано на рис. 105;

б) **якорь**. *Якорем* называется вращающаяся часть электрической машины. Якорь составлен из листов стали, которые покрыты изолирующим лаком для уменьшения потерь на вихревые токи. На внешней цилиндрической поверхности якоря выфрезерованы *продольные пазы*. В эти пазы укладываются изолированные проводники обмотки якоря. Обмотка при вращении яко-

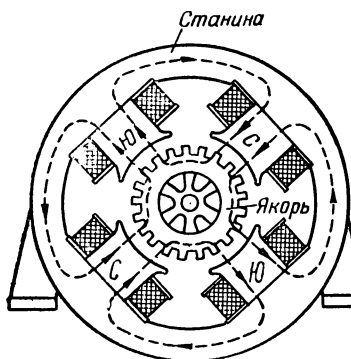


Рис. 105. Схема устройства станины машины постоянного тока.

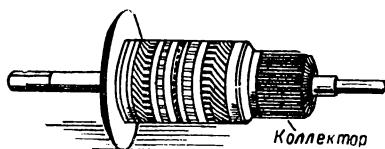


Рис. 106. Внешний вид якоря машины постоянного тока.

ря пересекает магнитные силовые линии поля, благодаря чему в проводниках обмотки якоря появляется электродвижущая сила. Внешний вид якоря машины

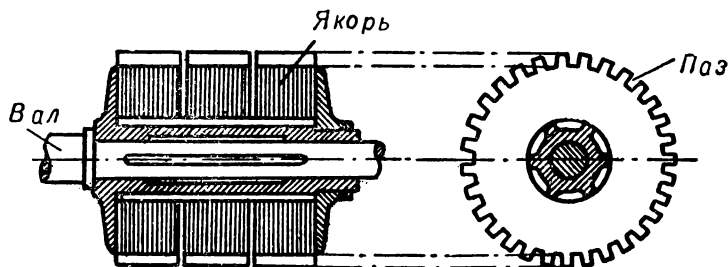


Рис. 107. Разрез якоря машины постоянного тока.

постоянного тока показан на рис. 106, а разрез его на рис. 107. Внутри якоря имеется вал, концы которого находятся в подшипниках станины;

в) **коллектор**. Коллектор находится на одном валу с якорем. Коллектор предназначен для того, чтобы возникающие в обмотке якоря токи разного направления

преобразовывались во внешней цепи в постоянный ток. Он состоит из набора медных пластин, разделенных между собой изоляцией. Общая внешняя поверхность пластин имеет цилиндрическую форму. К коллекторным пластинам припаяны отводы от обмотки якоря. По цилиндрической поверхности его скользят щетки. От щеток идут провода к потребителю электрической энергии. Коллектор вращается вместе с якорем. Одна из щеток всегда скользит по тем пластинам коллектора, которые соединены с проводниками обмотки якоря, дающими ток во внешнюю цепь. Через другую щетку и пластины коллектора ток возвращается в обмотку якоря.

Принцип действия генератора постоянного тока можно понять из рис. 104. Здесь коллектор состоит из двух пластин, к которым присоединены концы одного витка обмотки. Если коллектор вместе с витком обмотки вращается, то неподвижные щетки скользят по его полукольцам. Виток обмотки можно представить себе состоящим из двух проводников, из которых на рисунке один зачерчен. Когда проводник *аб* проходит под северным полюсом, а проводник *вг* — под южным, то в них индуцируются электродвижущие силы, направленные так, как показано на рисунке стрелками. Эти э.д.с. в рассматриваемый нами момент складываются и действуют в одном направлении так, что во внешней цепи генератора появляется ток, направленный от первой щетки ко второй.

При прохождении проводников под полюсами других названий направление индуцируемой в них э.д.с. изменится на противоположное, но и при этом положении в проводнике *аб* действует э. д. с., направленная к первой щетке, а в проводнике *вг* — э.д.с., направленная от второй щетки. Благодаря этому во внешней цепи направление тока сохранится таким же, каким оно было при рассмотрении предыдущего положения витка. Когда виток занимает вертикальное положение, э. д. с. в проводниках равна нулю. Щетки в это время находятся на разделяющих пластины коллектора изолирующих прокладках.

Таким образом, во внешней цепи направление тока не изменяется, так как вместе с проводниками витка поворачиваются и пластины коллектора, соединенные с ним. Если в первом положении с первой щеткой соприкасалась первая пластина коллектора, то во втором с этой же

щеткой соприкасается вторая пластина. Во внешней цепи генератора благодаря наличию коллектора циркулирует ток, не меняющийся по направлению, но изменяющийся по величине. Такой ток называется *пульсирующим*. Чтобы пульсация была возможно меньшей, на якоре машины размещают не один виток обмотки, а много. Эти витки обмотки расположены на якоре равномерно и смещены один относительно другого на определенный угол. Коллектор состоит не из двух пластин, а из большого количества их. Такое устройство обмотки и коллектора на много уменьшает пульсацию тока.

§ 105. Э. Д. С. ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электродвижущая сила генератора постоянного тока тем больше, чем больше витков имеет обмотка якоря, чем выше скорость вращения и чем сильнее магнитное поле якоря, создаваемое полюсами машины.

Чем больше проводников, составляющих обмотку якоря, тем больше должна быть электродвижущая сила, возникающая в нем, так как электродвижущие силы, возникающие в проводниках обмотки, складываются между собой. Величина электродвижущей силы зависит также от скорости вращения якоря, так как чем быстрее вращается якорь, тем больше скорость пересечения магнитных силовых линий полюсов проводниками обмотки.

Электродвижущая сила, возникающая в якоре, должна увеличиваться, если увеличивается магнитный поток полюсов генератора, так как при этом возрастает количество магнитных силовых линий, которые пересекают каждый проводник обмотки в единицу времени.

§ 106. ОБМОТКА ЯКОРЯ

Наибольшее распространение имеют *барабанные обмотки*, которые укладываются в продольные пазы барабанных якорей. Обмотки якоря выполняются в виде отдельных секций.

Секцией называют часть обмотки якоря, которая находится между двумя коллекторными пластинами. Проводники секции, уложенные в продольные пазы, являются *активной частью обмотки*. При вращении якоря они пересекают магнитные линии поля, и в них возникает

электродвижущая сила. Эти проводники называют *активными сторонами секции*. Если одна активная сторона секции находится под полюсом одного наименования, то другая сторона в это время должна проходить под полюсом машины другого наименования.

Барабанные обмотки бывают *петлеобразные* и *волнообразные*. Первые из них называют также *параллельными*, или *петлевыми*, вторые — *последовательными*, или *волновыми*. Конструкция обмотки зависит от количества полюсов машины, количества активных проводников и шага обмотки. *Шагом обмотки* называют то число пазов, на которое смещены начальные стороны двух соседних секций.

В петлевой обмотке секция составляется в виде петли. Она может состоять из нескольких витков. Выводы петлевой обмотки припаиваются к двум соседним коллекторным пластинам. Петлевая обмотка изображена на рис. 108. Результирующий шаг петлевой обмотки $y = 2$. Это значит, что начальные стороны двух соседних секций смещены на два пазы. Развернутая схема петлевой обмотки дана на рис. 109.

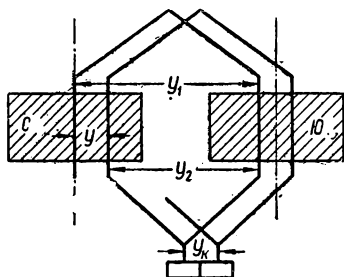


Рис. 108. Петлевая обмотка.

В волновой обмотке, в отличие от петлевой, выводы одной и той же секции припаиваются не к соседним пластинам коллектора, а к пластинам, которые находятся на его противоположных сторонах. Развернутая схема волновой обмотки изображена на рис. 110. Результирующий шаг этой обмотки равен сумме ее частичных шагов. Частичные шаги должны быть представлены нечетными числами.

Число пазов, показывающих расстояние между двумя сторонами одной секции, называют *первым частичным шагом*. Число пазов, на которое смещены начальная сторона секции и конечная сторона предыдущей секции, называют *вторым частичным шагом*.

Таким образом, результирующий шаг петлевой обмотки

$$y = y_1 - y_2.$$

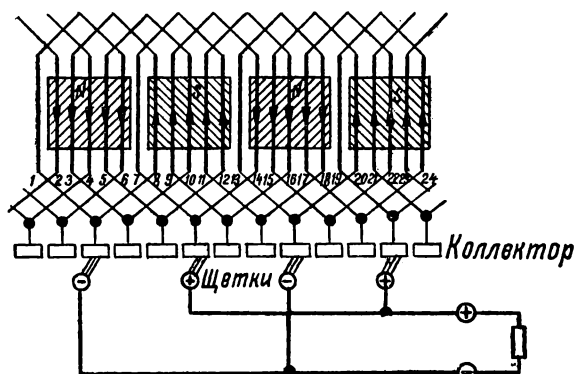


Рис. 109. Развернутая схема петлевой обмотки.

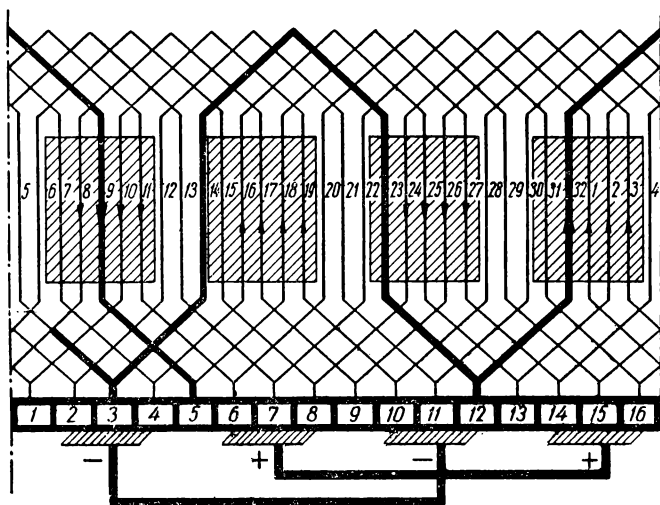


Рис. 110. Развернутая схема волновой обмотки.

Для волновой обмотки результирующий шаг определится по формуле

$$y = y_1 + y_2.$$

Здесь y_1 — первый частичный шаг и y_2 — второй частичный шаг.

§ 107. ГЕНЕРАТОРЫ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ И ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

В машинах постоянного тока питание обмоток возбуждения, т. е. обмоток электромагнитов, осуществляется двумя способами: последовательным и параллельным возбуждением.

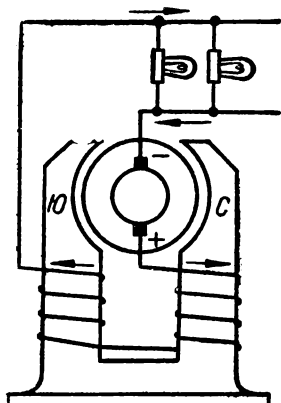


Рис. 111. Схема машины с последовательным возбуждением.

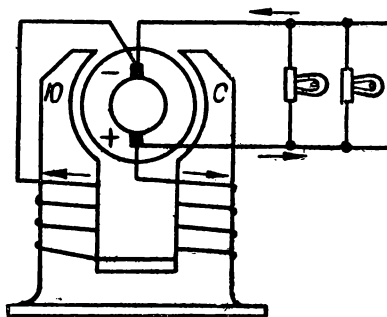


Рис. 112. Схема машины с параллельным возбуждением.

В машинах с *последовательным возбуждением* обмотка возбуждения включается последовательно с обмоткой якоря. Схема машины с последовательным возбуждением показана на рис. 111.

Машины с *параллельным возбуждением* отличаются тем, что обмотка возбуждения в них включается параллельно якорю. Принципиальная схема двухполюсной машины с параллельным возбуждением изображена на рис. 112. В этих машинах ток возбуждения составляет небольшую часть тока якоря, поэтому сопротивление параллельной обмотки возбуждения по сравнению с сопро-

тивлением обмотки якоря должно быть довольно значительным. Обыкновенно ток в обмотке возбуждения не превышает 5% номинального тока нагрузки машины. Если графически изобразить зависимость между напряжением у зажимов генератора и током во внешней цепи, то такой график называется *внешней характеристикой генератора*. Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением показана на рис. 113.

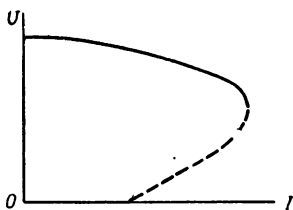


Рис. 113. Внешняя характеристика генератора с параллельным возбуждением.

Кроме последовательного и параллельного возбуждения, применяется также *смешанное возбуждение*. В этом случае генератор имеет как параллельную обмотку возбуждения, так и последовательную. В генераторах со смешанным возбуждением результирующий поток обмоток возбуждения почти не изменяется с изменением нагрузки. Напряжение на за-

жимах генератора со смешанным возбуждением при изменении тока нагрузки также не изменяется. Это качество генератора со смешанным возбуждением используется для того, чтобы обеспечить постоянное напряжение в цепи независимо от изменения количества включаемых в цепь потребителей электроэнергии.

§ 108. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ

Напряжение на зажимах генераторов регулируется при помощи реостатов, включаемых параллельно или последовательно с обмотками возбуждения.

Напряжение генератора с последовательным возбуждением регулируется реостатом, который включают параллельно с обмоткой возбуждения, как это показано на рис. 114. С увеличением сопротивления реостата ток, проходящий через него, будет уменьшаться, в обмотке возбуждения ток будет возрастать. Магнитный поток обмотки возбуждения, проходящий через якорь, также будет возрастать и вместе с этим увеличится электродвижущая сила генератора.

Регулятор напряжения генератора с параллельным возбуждением включается последовательно с обмоткой возбуждения. Схема его включения показана на рис. 115. Если сопротивление этого регулирующего реостата уменьшать, то ток в обмотке возбуждения будет увеличиваться. Магнитный поток, пронизывающий якорь, возрастет, и электродвижущая

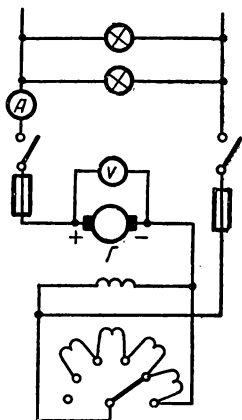


Рис. 114. Генератор с последовательным возбуждением и регулятором напряжения.

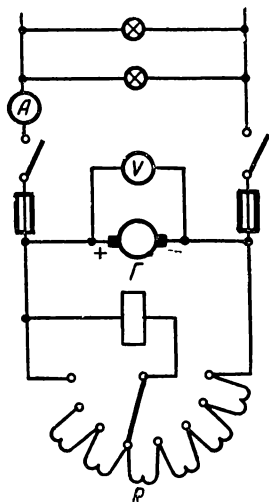


Рис. 115. Включение регулятора напряжения с генератором с параллельным возбуждением.

сила генератора увеличится. Если ток во внешней цепи уменьшается, то сопротивление реостата надо увеличивать. При этом электродвижущая сила уменьшается, а напряжение на зажимах генератора остается неизменным.

§ 109. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электрические машины постоянного тока характерны тем, что они являются обратимыми машинами. Они могут работать в качестве генератора или в качестве двигателя без изменения конструкции. Если машина работает в качестве генератора, то ее якорь вращает механический двигатель. Если по обмотке якоря пропустить постоянный

ток от внешнего источника электрической энергии, то эта же машина будет работать в качестве электрического двигателя.

Электродвигатели работают на принципе взаимодействия между проводником с электрическим током и магнитным полем, в котором находится проводник. Механическая сила, возникающая в результате такого взаимодействия, заставляет проводник с током перемещаться в том или ином направлении. Направление перемещения проводника зависит от направления тока в проводнике и от направления магнитного поля. Так как проводники обмотки укреплены на якоре, то с перемещением проводников в магнитном поле якорь начнет вращаться. Направление вращения якоря может быть установлено по правилу левой руки.

Принцип обратимости электрических машин постоянного тока был впервые открыт нашими учеными — академиками Ленцем и Якоби.

§ 110. ДВИГАТЕЛИ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ И ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

Подобно генераторам постоянного тока двигатели постоянного тока могут быть с параллельным, последовательным или смешанным возбуждением.

Принципиальная схема двигателя с последовательным возбуждением показана на рис. 116.

Двигатели с последовательным возбуждением характерны тем, что в начальный момент их пуска вращающее усилие, появляющееся на валу якоря, имеет наибольшее значение. Это позволяет применять двигатели с последовательным возбуждением там, где необходимо в момент пуска преодолеть значительное сопротивление приводимых в движение устройств. Двигатели с последовательным возбуждением применяются в транспортных устройствах с электрической тягой: трамваях, электропоездах и других устройствах.

Пуск двигателей такого типа осуществляется при помощи пусковых реостатов. Регулирование скорости вращения якоря осуществляется с помощью регулирующих реостатов, которые включаются параллельно обмотке возбуждения.

Принципиальная схема включения двигателя с параллельным возбуждением изображена на рис. 117. С увеличением нагрузки скорость вращения двигателей с параллельным возбуждением уменьшается, но весьма незначительно. Разница в числе оборотов при полной нагрузке двигателя и при холостом ходе обычно бывает не более 4%. Поэтому такие двигатели применяют в тех случаях, когда необходимо, чтобы скорость вращения

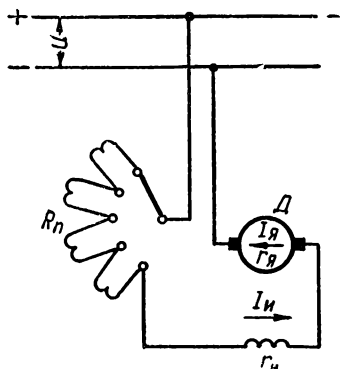


Рис. 116. Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением.

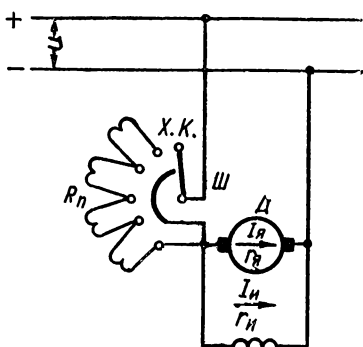


Рис. 117. Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением.

при изменении нагрузки практически не изменялась. Двигатели с параллельным возбуждением включаются при помощи пусковых реостатов, которые вводятся в цепь обмотки якоря последовательно. Это необходимо для того, чтобы ток, ответвляющийся в момент пуска в обмотку возбуждения, был больше нормального и чтобы при этом пусковой момент вращения был достаточным по величине.

Сопротивление реостата, которое вводится в обмотку якоря при пуске, предохраняет также эту обмотку от сгорания. По мере возрастания скорости вращения якоря сопротивление реостата уменьшают. Когда якорь развивает нормальные обороты, реостат выключают полностью.

§ 111. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

О полезном использовании электрических машин можно судить по величине их коэффициента полезного действия. Коэффициентом полезного действия называют

отношение полезной мощности к мощности затрачиваемой. Коэффициент полезного действия двигателя определяется отношением полезной механической мощности, получаемой на валу его, к затраченной электрической мощности.

Коэффициент полезного действия выражается в процентах. Для машин постоянного тока незначительной мощности он составляет около 80%.

В электрических машинах часть мощности теряется на перемагничивание сердечников якорей на вихревые токи в них, на трение в подшипниках и тому подобное.

ГЛАВА 2

ТРАНСФОРМАТОРЫ И МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 112. ТРАНСФОРМАТОРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Трансформатором называется устройство, которое служит для повышения или понижения напряжения в цепи переменного тока.

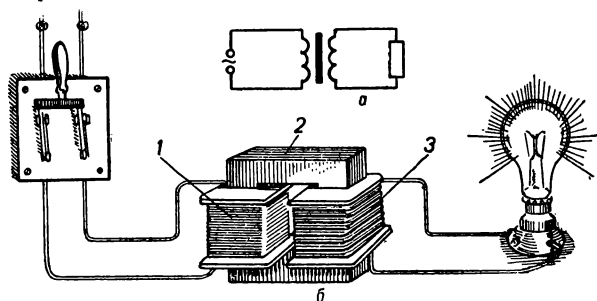


Рис. 118. Трансформатор:

1 — первичная обмотка; 2 — железный сердечник;
3 — вторичная обмотка.

Трансформатор представляет собой электромагнитное устройство. Самый простой по устройству трансформатор состоит из стального сердечника и двух обмоток, которые помещены на этом сердечнике. Обмотки изготовляются из изолированного медного провода. Та обмотка, которая соединяется с *зажимами источника тока*, называется *первичной*. К *другой обмотке* подключается *потребитель* электрической энергии. Эта обмотка называется *вторичной*. Устройство простейшего трансформатора и его электрическая схема изображены на рис. 118, а, б.

Когда первичная обмотка присоединена к источнику э. д. с., переменный ток проходит по ее виткам, и при этом в стальном сердечнике появляется переменное магнитное поле. Силовые линии этого поля пересекают витки вторичной обмотки. Благодаря этому во вторичной обмотке индуцируется электродвижущая сила. Таким образом, передача энергии от первичной обмотки ко вторичной осуществляется переменным магнитным потоком. Увеличение магнитного потока в трансформаторе достигается при помощи стального сердечника, однако и без этого сердечника трансформатор может выполнять свои функции. Если трансформатор применяется для преобразования переменного тока высокой частоты, то в нем стального сердечника может и не быть.

Индуктируемая во вторичной обмотке электродвижущая сила зависит от величины магнитного потока, скорости, с которой он изменяется, и от числа витков этой обмотки. Напряжение на зажимах вторичной обмотки будет больше или меньше напряжения на зажимах первичной обмотки в зависимости от того, в каком соотношении находится количество витков этих обмоток. О соотношении между первичным и вторичным напряжением можно судить по коэффициенту трансформации.

Коэффициентом трансформации называют отношение напряжения первичной обмотки к напряжению на зажимах вторичной обмотки. Таким образом, коэффициент трансформации

$$K = \frac{U_1}{U_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}.$$

Здесь ω_1 — число витков первичной обмотки, а ω_2 — число витков вторичной обмотки.

Трансформатор может служить как для повышения напряжения, так и для понижения его. В первом случае он называется *повышающим*, а во втором — *понижающим*.

В *повышающем* трансформаторе число витков вторичной обмотки больше, чем в первичной, а в *понижающем* — меньше.

Из сказанного выше следует, что трансформатор только преобразовывает электрическую энергию и не может служить ее источником. Если пренебречь потерями мощности в трансформаторе, то мощность, затрачиваемая

в первичной обмотке, должна равняться мощности, получаемой во вторичной обмотке. Следовательно, обозначив ток и напряжение первичной обмотки через U_1 и I_1 , а во вторичной обмотке — U_2 и I_2 , получим

$$U_1 I_1 = U_2 I_2.$$

Если из этого выражения найти отношение напряжений первичной и вторичной обмоток, то получится

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{I_1}{I_2}.$$

Отсюда следует такой вывод: если в первичной обмотке напряжение больше, чем во вторичной, то ток в первичной обмотке должен быть меньше, чем во вторичной.

Напряжения в обмотках трансформатора всегда обратно пропорциональны величинам токов в этих обмотках.

Обмотки трансформаторов рассчитываются на определенный ток, поэтому они должны всегда включаться только на то напряжение, которое на них указано.

Пример 45. Определить напряжение на первичной обмотке трансформатора, если на вторичной обмотке оно равно 220 в, коэффициент трансформатора равен 4.

Решение. Коэффициент трансформации трансформатора.

$$K = \frac{U_1}{U_2}.$$

Подставив величины, получим

$$U_1 = KU_2 = 4 \cdot 220 = 880 \text{ в.}$$

Пример 46. Напряжение первичной обмотки 120 в, напряжение вторичной обмотки 240 в, сила тока первичной обмотки 5 а. Найти силу тока во вторичной обмотке.

Решение.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1},$$

$$I_2 = \frac{U_1 I_1}{U_2} = \frac{120 \cdot 5}{240} = 2,5 \text{ а.}$$

§ 113. РАБОТА ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПОД НАГРУЗКОЙ

Если вторичная обмотка трансформатора разомкнута, т. е. не несет нагрузки, то коэффициент мощности трансформатора имеет небольшое значение. Его вели-

чина в среднем составляет 0,5. По мере того как увеличивается нагрузка трансформатора, возрастает и коэффициент мощности. При полной нагрузке он почти достигает единицы.

Коэффициент полезного действия трансформатора равен отношению полезной мощности, получаемой во вторичной обмотке при нагрузке, к мощности, которая подводится к первичной обмотке. Обозначив мощность в первичной обмотке через P_1 , во вторичной обмотке через P_2 , получим коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_1 I_1 \cos \varphi_1}.$$

В трансформаторах потеря мощности получается, главным образом, за счет гистерезиса и вихревых токов, возникающих в его сердечнике.

Благодаря тому, что в трансформаторе нет вращающихся деталей и, следовательно, нет потерь на трение, коэффициент полезного действия его бывает значительным и достигает 98%.

§ 114. ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трехфазные трансформаторы широко применяются в промышленности. Трехфазный трансформатор имеет три связанных между собой сердечника. На сердечниках расположены обмотки фаз так, как это

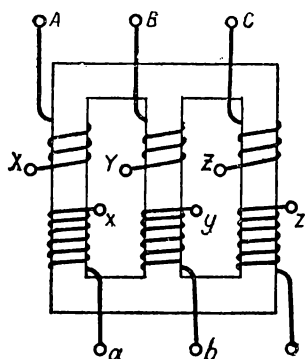


Рис. 119. Схема трехфазного трансформатора.

Схемы соединения обмоток		Условные обозначения
Высокое напряжение	Низкое напряжение	

Рис. 120. Схема соединения обмоток трехфазного трансформатора.

показано на рис. 119. Обмотки трансформатора включаются как звездой, так и треугольником. Схемы соединения обмоток различными способами даны на рис. 120. Коэффициент полезного действия трехфазных трансформаторов бывает такой же, как и у однофазных трансформаторов.

§ 115. АВТОТРАНСФОРМАТОРЫ

Автотрансформатором называется такой трансформатор, у которого первичная и вторичная обмотки имеют общие витки. Полное число витков его образует одну об-

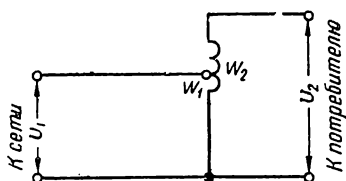


Рис. 121. Повышающий автотрансформатор.

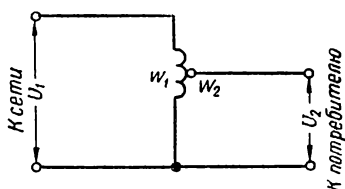


Рис. 122. Понижающий автотрансформатор.

мотку. Автотрансформаторы могут быть как повышающие, так и понижающие. Схемы повышающего и понижающего трансформаторов приведены на рис. 121 и 122.

Коэффициент полезного действия автотрансформаторов бывает очень высоким и достигает до 99%.

§ 116. ГЕНЕРАТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Устройство генераторов переменного тока основано на применении явления индукции. Таким образом, принцип действия генераторов переменного тока и генераторов постоянного тока одинаков.

Конструктивно генераторы переменного тока отличаются от генераторов постоянного тока прежде всего тем, что у них отсутствует коллектор. Вместо коллектора на валу вращающейся части машины находятся кольца, по которым скользят неподвижные щетки. От щеток переменный ток поступает во внешнюю цепь к потребителям электрической энергии.

В большинстве случаев генераторы переменного тока устроены так, что частота переменного тока, получаемого от них, равна 50 гц.

Частота переменного тока, получаемого от генератора, зависит от скорости вращения ротора, поэтому скорость вращения ротора должна быть вполне определенной. Если генератор имеет p пар полюсов, а ротор делает n оборотов в минуту, то частота переменного тока может быть определена по формуле

$$f = p \frac{n}{60} .$$

Число оборотов в минуту может быть найдено из этой формулы:

$$n = \frac{60f}{p} .$$

Из этих формул видно, что с изменением скорости вращения ротора должна измениться и частота переменного тока, получаемого от генератора.

Генераторы переменного тока с неподвижными полюсами и вращающимся якорем применяются, главным образом, для установок малой мощности. Генераторы значительной мощности строятся так, чтобы якорь у них был неподвижным, а полюса электромагнитов вращались. Для питания электромагнитов постоянным током применяется вспомогательный источник — машина постоянного тока, мощность которой составляет обычно 0,5% мощности генератора.

Если якорная обмотка генератора неподвижна, то ее легче изолировать и проще отводить переменный ток, который в генераторах большой мощности может достигать значительной величины.

В трехфазных генераторах переменного тока обмотки располагаются так, чтобы получались три самостоятельные цепи, в которых возникают электродвижущие силы, сдвинутые одна по отношению к другой по фазе на 120° .

Схема устройства трехфазного генератора приведена на рис. 123. Роторы генераторов, вращающиеся водяными турбинами или двигателями внутреннего сгорания, изготавливаются обычно с явно выраженными полюсами

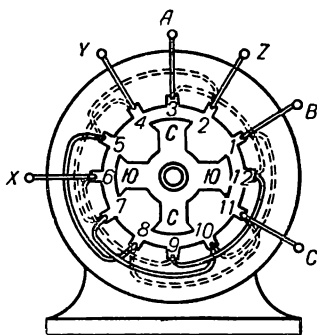


Рис. 123. Схема устройства трехфазного генератора.

и бывают, как правило, тихоходными. Быстроходные генераторы изготавливаются с неявно выраженными полюсами. Роторы этих генераторов вращаются паровыми турбинами. Такие генераторы называются *турбогенераторами*.

§ 117. СИНХРОННЫЕ И АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Синхронные двигатели по своей конструкции ничем не отличаются от генераторов переменного тока. Вращение ротора синхронного двигателя происходит вследствие взаимодействия магнитных потоков, которые создаются постоянным током, проходящим в обмотке ротора, и переменным током обмотки статора. Ротор синхронного двигателя должен вращаться с определенной скоростью. Если эта скорость нарушается, то двигатель останавливается. Поэтому для пуска синхронного двигателя необходимо сначала довести до определенной скорости вращение его ротора, для чего необходимо пользоваться каким-либо посторонним двигателем. Этот недостаток синхронных двигателей препятствует их широкому применению.

Наиболее распространенными электродвигателями переменного тока являются асинхронные. Они работают на принципе использования вращающегося магнитного поля, которое создается при прохождении в обмотках статора трехфазного тока.

Вращающееся магнитное поле образуется благодаря тому, что трехфазный ток поступает в три обмотки статора. Эти обмотки сдвинуты одна относительно другой на 120° . Токи в обмотках статора также сдвинуты относительно друг друга на третью часть периода. Каждая из обмоток статора при прохождении в ней тока создает свое переменное магнитное поле. Три магнитных поля складываются и образуют общее магнитное поле, которое вращается внутри статора.

Вращающееся магнитное поле можно представить себе как следствие вращательного движения полюсов магнита. Вращающееся магнитное поле статора индуцирует в проводниках ротора ток и увлекает их за собой. Статор асинхронных двигателей имеет такую же конструкцию, как и статор трехфазного генератора. Внешний вид такого статора показан на рис. 124. Ротор у двига-

телей небольшой мощности состоит из ряда медных неизолированных прутьев, которые скрепляются боковыми кольцами. Общий вид такого ротора напоминает «беличье колесо». Отсюда и происходит название обмотки ро-

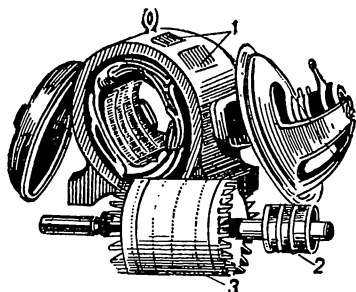


Рис. 124. Составные части синхронного двигателя:
1 — статор; 2 — контактные кольца; 3 — ротор.

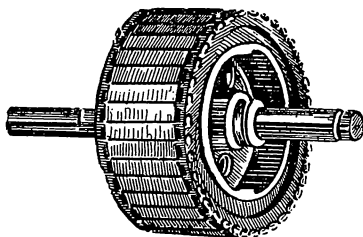


Рис. 125. Ротор асинхронного двигателя, выполненный в виде «беличьего колеса».

тора этого типа. Внешний вид ротора, выполненного в виде «беличьего колеса», показан на рис. 125, а схема устройства «беличьего колеса» — на рис. 126. Асинхронные двигатели, имеющие ротор в виде «беличьего колеса», называются *двигателями с короткозамкнутым ротором*.

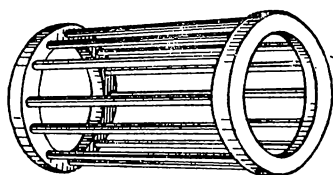


Рис. 126. Схема ротора, выполненного в виде «беличьего колеса».

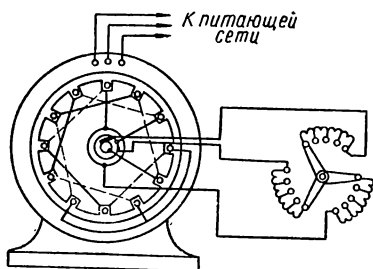


Рис. 127. Схема включения асинхронного двигателя с пусковым реостатом.

Асинхронные двигатели называются так потому, что в процессе их работы скорость вращения ротора не совпадает со скоростью вращения магнитного поля статора и несколько отстает от него.

Обмотки статора трехфазного двигателя в случае необходимости могут быть соединены звездой или треугольником. Если линейное напряжение сети, в которую включен двигатель, соответствует номинальному фазовому напряжению двигателя, то его обмотки включаются треугольником. В тех случаях, когда линейное напряжение превышает номинальное фазное напряжение двигателя в $\sqrt{3}$ (корень из трех) раз, обмотки его соединяются звездой.

Если мощность двигателя превышает три киловатта, то для его пуска применяют пусковой реостат. Такой реостат необходим для уменьшения тока, который возникает в обмотке ротора в момент пуска двигателя из-за большого скольжения. *Скольжением* двигателя называют разницу между скоростью вращения ротора и скоростью вращения магнитного поля, выраженную в виде отношения.

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

где n_2 — число оборотов ротора в минуту, n_1 — число оборотов магнитного поля статора. Схема включения асинхронного двигателя с пусковым реостатом показана на рис. 127.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И УСТРОЙСТВА**§ 118. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП**

Электронные лампы являются важнейшими элементами многих современных электротехнических приборов и устройств. Роль и значение электронных ламп в развитии радиотехники трудно переоценить. Но не только радиотехника связана в своем бурном росте с прогрессом электронной техники. Электронные приборы в наше время настолько широко применяются, что если бы мы поставили своей задачей составить только подробный перечень использования этих приборов для разных целей, он занял бы очень много места. Напомним хотя бы некоторые основные функции электронных ламп, выполняемые ими в разных областях техники.

В радиотехнике электронные лампы позволяют преобразовывать постоянный ток в переменный высокой частоты и, наоборот,— переменный ток в постоянный. При помощи электронных ламп осуществляется усиление слабых колебаний и модуляция или управление колебаниями высокой частоты. Они дают возможность выделить сигнал, действующий на колебания высокой частоты при модуляции, т. е. осуществить детектирование.

Электронные лампы преобразовывают одни частоты в другие. Аналогичные функции выполняют электронные лампы при телефонировании и телеграфировании по частотным каналам линий проводной связи, в телевидении, фототелеграфии.

Электронные лампы применяются в металлургии для высокочастотной плавки металлов, в инструментальном деле для закалки инструментов, в геологии при обнаружении в недрах земли запасов руды и металлов. Специ-

альными устройствами с электронными лампами пользуются в медицине, сельском хозяйстве, авиации, метеорологии и во многих других областях народного хозяйства.

§ 119. ПРИНЦИП РАБОТЫ

Нагревание металлических проводников вызывает усиление движения свободных электронов в разных направлениях проводника. Вначале это движение ограничивается только пределами нагреваемого тела, а затем, когда температура нагрева достигает значительной величины, некоторые свободные электроны в своем стремительном движении вырываются за пределы проводника наружу. Нагретое тело начинает излучать электроны в окружающее его пространство.

Излучение электронов телами называют электронной эмиссией. Если эмиссия электронов является следствием нагревания тела, ее принято называть термоэлектронной.

Термоэлектронная эмиссия положена в основу действия электронных ламп.

Электронная эмиссия может быть вызвана не только нагреванием. Направив на металлическую пластинку пучок быстро летящих электронов или ионов, можно вызвать так называемую вторичную эмиссию из пластинки. Под влиянием такой электронной бомбардировки электроны из пластинки будут вырываться в окружающее ее пространство.

Эмиссию могут вызвать лучи света, падающие на поверхность некоторых веществ. Такая эмиссия называется фотоэмиссией.

Электронная лампа имеет обычно два или несколько электродов. Одним электродом является нить, которая при пропускании тока нагревается (нить накала, или катод). В разогретом состоянии катод служит излучателем электронов. Чтобы направить движение освободившихся электронов в определенном направлении, в лампу вводят другой электрод, называемый анодом. Его назначение — притягивать электроны. Совершенно очевидно, что электрод сможет осуществлять эту функцию, если он будет иметь положительный потенциал.

Итак, при наличии положительного потенциала на аноде в электронной лампе возникает поток электронов

от катода к аноду. В соответствии с существующими понятиями этот поток электронов можно рассматривать как электрический ток, идущий в обратном направлении.

Основной принцип действия электронной лампы показан на рис. 128.

В электронную лампу вводят между катодом и анодом еще один дополнительный электрод, называемый сеткой. Изменяя величину потенциала на сетке и его знак, можно управлять величиной анодного тока.

Электронная лампа состоит из стеклянного или металлического баллона, в котором находятся анод, катод и сетки. Концы этих электродов выходят из баллона наружу и подводятся к ножкам цоколя. В некоторых лампах выводы анода и сетки находятся в верхней части лампы или сбоку ее.

Из баллона воздух выкачивается, вакуум внутри его доводится до значительной степени. Это необходимо для того, чтобы нить накала лучше сохранялась и срок действия лампы был более продолжительным.

Катоды в лампах бывают прямого и косвенного накала.

В лампах с косвенным накалом или же с подогревным катодом последний состоит из металлической трубки, внутри которой проходит нить накала. Нить и катод разделены фарфоровой изоляцией или же изоляцией из особого состава.

Катоды изготавливают из вольфрама. Обыкновенный вольфрамовый катод, нагретый до температуры 2200° , может обеспечить ток в 6 *ма* на каждый ватт мощности, расходуемой на накал нити.

Увеличения электронной эмиссии достигают, применяя ториевые, бариевые или оксидированные катоды. Такие катоды называют активированными. Ториевый катод, нагреваясь до 1600° , дает ток 40 *ма* на ватт, оксидированный — 100 *ма*, нагреваясь только до 800° .

Бариевый катод при температуре 600° обеспечивает ток 120 *ма*. Активированные катоды при перегреве теряют эмиссию и восстановить ее невозможно, так как активный слой испаряется.

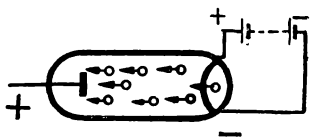


Рис. 128. Схема действия электронной лампы.

Катод лампы окружен сеткой, которая охватывает его по спирали. Сетка изготавливается из молибденовой проволоки.

Сетку охватывает анод, имеющий цилиндрическую или плоскую форму. В мощных лампах анод изготавливают из тугоплавких металлов — молибдена или тантала. В лампах меньшей мощности анод изготавливается из никеля.

§ 120. ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПАРАМЕТРЫ ЛАМП

Выпускаемые промышленностью лампы снабжаются паспортами. В паспорте лампы приводится ее характеристика и некоторые данные, определяющие условия ее работы.

Характеристики лампы показывают зависимость величины тока в анодной, сеточной или экранной цепи от на-

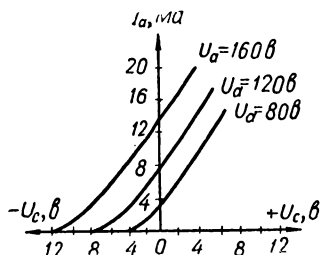


Рис. 129. Семейство анодно-сеточных характеристик.

пряжения на управляющей или экранной сетке. Имеется в виду, что анодное напряжение и напряжение накала остаются постоянными.

Если группа кривых, определяющих указанную зависимость, получена при разных анодных напряжениях, их называют семейством характеристик. На рис. 129 изображено семей-

ство анодно-сеточных характеристик. Здесь U_a — напряжение на аноде и U_c — напряжение на сетке.

Постоянные величины, характеризующие работу электронной лампы, называются ее параметрами. Основными параметрами электронной лампы являются крутизна характеристики, коэффициент усиления, внутреннее сопротивление и добротность ее.

Крутизна характеристики обозначается буквой S и показывает, на сколько миллиампер изменяется анодный ток, если напряжение на сетке изменилось на 1 в. Если изменение анодного тока обозначить ΔI_a , а изменение сеточного напряжения ΔU_c то величина крутизны характеристики

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \text{ ма/в.}$$

Во многих случаях применение электронных ламп лучше, когда при одном и том же изменении сеточного напряжения изменение анодного тока больше. Ясно, что при этом характеристика лампы должна быть круче. Разная крутизна характеристики показана на рис. 130. Наибольшее значение крутизна имеет в прямолинейной части характеристики. На загибах ее крутизна меньше.

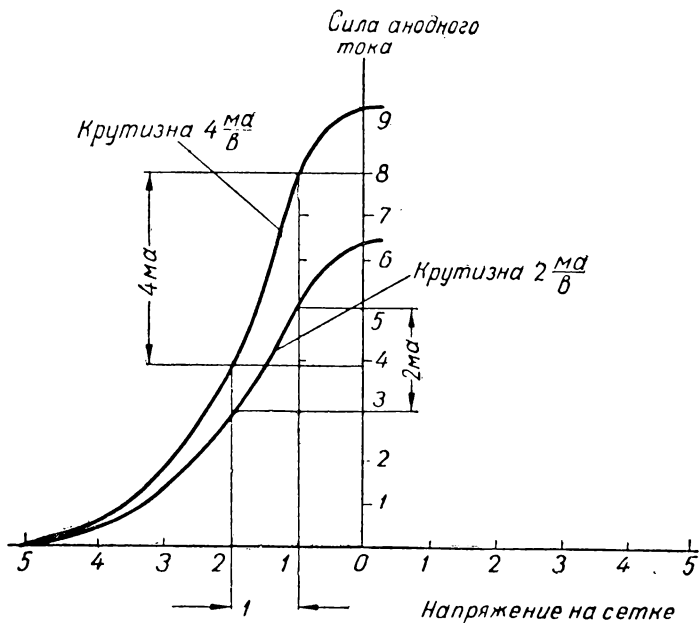


Рис. 130. Крутизна характеристики электронной лампы.

Коэффициент усиления обозначается греческой буквой μ . Этот коэффициент показывает, во сколько раз надо изменить потенциал анода по сравнению с изменением потенциала сетки, чтобы получить одинаковое изменение анодного тока.

Коэффициент усиления равен следующему отношению:

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}.$$

Здесь U_a — изменение напряжения на аноде. При определении коэффициента усиления анодный ток

должен оставаться неизменным. Чтобы определить коэффициент усиления, надо иметь две анодно-сеточные характеристики. Определение коэффициента усиления можно показать на следующем простом примере.

Допустим, что изменение анодного тока на 6 *ма* можно получить изменением анодного напряжения на 40 *в*. Это же изменение анодного тока будет при изменении сеточного напряжения на 2 *в*. Ясно, что коэффициент усиления будет в этом случае равен 20.

Внутреннее сопротивление лампы обозначают буквой R_i . Оно показывает отношение изменения анодного напряжения к изменению анодного тока при постоянном сеточном напряжении. Таким образом, внутреннее сопротивление лампы

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}.$$

При определении внутреннего сопротивления надо анодное напряжение брать в вольтах и анодный ток в амперах, чтобы величину R_i получить в омах.

Добротность лампы равна произведению ее крутизны на коэффициент усиления. Если добротность лампы обозначить буквой Q , получим следующее соотношение:

$$Q = S\mu.$$

§ 121. ДИОДЫ

Наиболее простой в конструктивном отношении является двухэлектродная лампа, или диод. Внутри баллона такой лампы находится только анод и нить накала — катод.

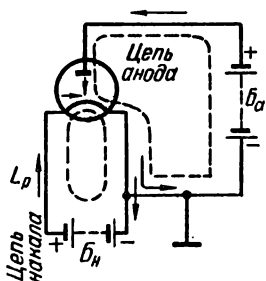


Рис. 131. Схема включения диода.

Схема включения диода изображена на рис. 131. На этом рисунке показаны накальная и анодная цепи с включенными в них батареями B_a (анодная) и B_k (накальная). В анодной цепи ток будет только в том случае, если положительный полюс анодной батареи включен на анод лампы, а отрицательный подводится к катоду ее. Диод пропускает ток

только в одном направлении, т. е. имеет одностороннюю проводимость. Поэтому диоды широко применяются для

выпрямления переменного тока. В радиоприемниках диоды применяются для выпрямления переменного тока высокой частоты (детектирования), автоматической регулировки режима работы и для других целей.

Диоды применяются также в качестве электронных выпрямителей. В этом случае их называют кенотронами. Кенотронные выпрямители применяют для питания анодных цепей радиостанций, усилителей, ламповых установок проводной связи и других схем.

ГЛАВА 2

ТРЕХЭЛЕКТРОДНЫЕ И МНОГОЭЛЕКТРОДНЫЕ ЛАМПЫ

§ 122. ТРИОДЫ

Трехэлектродные лампы, или триоды, кроме анода и катода, имеют еще управляющую сетку. Управление потоком электронов, проходящим от катода к аноду внутри лампы, осуществляется при помощи сетки в том случае, если между сеткой и катодом включено какое-то напряжение. В зависимости от того, как включается батарея на сетку, потенциал ее по отношению к катоду может быть положительным или отрицательным. При наличии напряжения на сетке она может энергично влиять на происходящие внутри лампы процессы. Если сетка заряжена отрицательно, она отталкивает электроны, вылетающие из катода, тормозит их движение к аноду. Из-за этого анодный ток, протекающий через лампу, будет уменьшаться. Положительное напряжение на сетке способствует продвижению электронов. Чем выше положительное напряжение на сетке, тем интенсивнее электроны устремляются к аноду. Анодный ток при этом будет возрастать. Часть электронов попадает на сетку. Их количество также связано с величиной положительного напряжения на ней. Таким образом, увеличению анодного тока сопутствует увеличение тока в цепи сетки.

Если положительное напряжение на сетке увеличивается, то наступит такое положение, при котором все излучаемые катодом электроны будут попадать на анод и на сетку. Анодный ток достигнет своего наибольшего возможного значения. Как бы ни увеличивалось в дальнейшем положительное напряжение на сетке, анодный

ток остается неизменным и больше не возрастает, так как он достиг величины насыщения. В этом случае лампа «открыта» полностью.

Управляющая сетка в триоде может быть густой или редкой. В одних лампах она располагается ближе к аноду, в других — к катоду. В связи с этим влияние сеток

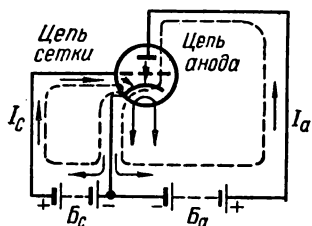


Рис. 132. Схема включения триода.

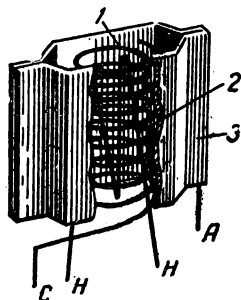


Рис. 133. Взаимное расположение электродов в триоде:

1 — сетка; 2 — нить накала; 3 — анод.

в различных лампах разное и зависит также от конструкции лампы.

На рис. 132 изображена принципиальная схема включения триодов, а на рис. 133 взаимное расположение электродов в лампах этого типа.

В тех случаях, когда нежелательно, чтобы в цепи сетки появлялся ток, на сетку должно быть подано отрицательное напряжение, называемое напряжением смещения. Для этого в цепь сетки включают специальную сеточную батарею.

§ 123. ТЕТРОДЫ

Тетрадами называют лампы с четырьмя электродами. Четвертый электрод является добавочной экранирующей сеткой. Наличие экранирующей сетки повышает коэффициент усиления лампы. Схема включения тетрода показана на рис. 134.

Коэффициент усиления можно было бы увеличить в тетроде, сделав его сетку более густой, но это затруднило бы продвижение электронов от катода к аноду. Очень густая сетка в электронной лампе привела бы к резкому

уменьшению анодного тока и возрастанию тока в цепи сетки, что нежелательно.

Управляющая и экранирующая сетки изготавливаются достаточно редкими и не мешают электронам попадать на анод. Экранирующая сетка выполняет роль электро-

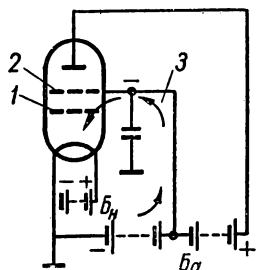


Рис. 134. Схема включения тетрода:

1 — управляющая сетка; 2 — экранирующая сетка; 3 — цепь экранирующей сетки.

статического экрана и устраняет вредное влияние анодной цепи на сеточную, которое возникает из-за наличия междуэлектродной емкости.

Если в триодах емкость между анодом и управляющей сеткой равна 3—5 пф, то в тетрадах она не превышает сотых долей пикофарды. Это имеет особенно большое значение при работе лампы в области высоких частот.

Коэффициент усиления тетродов достигает 300—500, тогда как в в триодах он бывает равен не более 100.

Напряжение между экранирующей сеткой и катодом обычно составляет 20—50% напряжения на аноде. При таком соотношении экранирующая сетка не может заметно влиять на катодный ток в сторону его уменьшения.

Наряду с положительными качествами тетрод имеет и отрицательные. Его недостатком является динаatronный эффект.

Динаatronный эффект заключается в том, что электро-

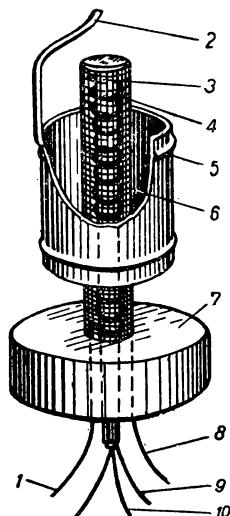


Рис. 135. Взаимное расположение электродов в тетраде:

1 — управляющая сетка; 2 — вывод от анода к контакту сверху баллона; 3 — катод; 4 — управляющая сетка; 5 — анод; 6 — экран; 7 — сетка; 8 — экранирующая сетка; 9 — катод; 10 — нить накала.

ны, попадая на анод, вызывают вторичную эмиссию. Они вырывают из металла анода другие электроны, которые могут мешать работе лампы. В диодах и триодах динактронный эффект также имеется, но в них выбитые из анода электроны снова притягиваются к нему.

В тетрадах мешающее влияние вторичных электродов не будет наблюдаться, если напряжение на экранирующей сетке меньше напряжения на аноде. В противном случае может появиться ток вторичной эмиссии, направление которого противоположно направлению анодного тока.

Взаимное расположение электродов в тетраде показано на рис. 135.

§ 124. ПЕНТОДЫ

Электронные лампы с пятью электродами, или пентоды, не имеют недостатков, присущих тетрадам. Пятый электрод в пентоде в виде сетки предназначен для защиты лампы от динактронного эффекта. Поэтому пятая сетка называется противодинактронной или защитной.

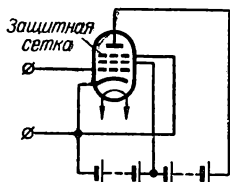


Рис. 136. Схема включения пентода.

Схема включения пентода изображена на рис. 136. Защитная сетка соединяется с катодом лампы, поэтому она имеет отрицательный потенциал относительно анода. Ее назначение — отбрасывать обратно на анод вылетающие из него вторичные электроны. Защитная сетка изготовляется редкой, поэтому она влияет на основную функцию анода мало и практически не мешает потоку электронов из катода попадать на анод.

В пентодах ток вторичной эмиссии не появляется даже тогда, когда напряжение анода меньше, чем на экранирующей сетке.

Коэффициент усиления пентодов достигает 3000—4000.

Внутреннее сопротивление пентодов равно сотням тысяч и даже миллионам ом. Крутизна характеристики у этих ламп такая же, как у триодов и тетродов. Паразитная емкость между анодом и управляющей сеткой у пентода меньше, чем у тетрода. Это объясняется допол-

нительным экранирующим влиянием противодинаatronной сетки.

Пентоды свободны от недостатков электронных ламп с меньшим числом электродов. Они работают без искажений, появляющихся в тетрадах при усилении сравнительно сильных колебаний. Явные преимущества пентодов привели к тому, что они в значительной степени вытеснили все другие типы ламп не только из усилительных и приемных устройств, но и из генераторных установок.

Пентоды являются основными типами современных усилительных и маломощных генераторных ламп.

§ 125. КОМБИНИРОВАННЫЕ ЛАМПЫ

Улучшение конструкций электронных ламп идет не только по пути увеличения числа электродов и устранения тех или иных недостатков, но и в направлении сочетания нескольких функций, выполняемых одной лампой. Для этого применяются комбинированные лампы, в которых в одном баллоне монтируются две или три лампы.

Благодаря этому такая комбинированная лампа может выполнять несколько различных функций.

Существуют различные комбинации комбинированных ламп. Двойные диоды используются, главным образом, в качестве детекторов. Двойные триоды позволяют, например, получить два каскада усиления на низкой частоте. При этом размеры аппаратуры уменьшаются. В комбинации двух диодов и триода (лампа 6Ж7) двойной диод может быть использован для детектирования, триод — для усиления низкой частоты.

Для приемников супергетеродинного типа применяются лампы с несколькими сетками: гексоды, пентагриды, октоды.

В многосеточных лампах электронный поток подчиняется действию двух управляющих сеток.

Пентагриды-смесители и пентагриды-преобразователи применяются обычно в радиостанциях. Пентагридами называют лампы с пятью сетками.

§ 126. ПАЛЬЧИКОВЫЕ ЛАМПЫ

В современных радиоустройствах широко применяются лампы «пальчикового» типа. Параметры пальчиковых ламп не только не уступают параметрам ламп больших

габаритов, но часто оказываются лучше их. В последнее время приемно-усилительные лампы выпускаются, главным образом, пальчиковые.

Электроды пальчиковых ламп крепятся непосредственно на их плоском стеклянном дне. Эти лампы не имеют специальных цоколей и электроды у них выведены наружу в виде тонких штырьков.

Пальчиковые лампы экономичны. Так, например, пальчиковому пентоду 1К2П необходим накал только 0,03 а при напряжении 1,2 в. По сравнению с лампами малогабаритной серии мощность пальчиковых ламп в четыре раза меньше. Намного меньше также напряжение анода и потребляемая от анодной батареи мощность.

Крутизна характеристики пальчиковых ламп 5—6 ма/в и выше. В новых типах ламп она достигает 20 ма/в, тогда как у старых ламп она была порядка 2 ма/в. Как известно, крутизна характеристики лампы определяет величину ее усиления.

Высокая крутизна характеристики ламп, главным образом, обеспечивается применением рамочных сеток. Эти сетки изготавливаются из очень тонкой проволоки, которая туго натягивается на рамку.

В тех случаях, когда радиоаппаратура должна быть особенно легкой и размеры ее минимальны, даже миниатюрные пальчиковые лампы мало пригодны. Для таких целей разработаны и выпускаются промышленностью сверхминиатюрные лампы, диаметр которых не превышает диаметра обыкновенного карандаша.

§ 127. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТРУБКИ

Устройство современных электронно-лучевых трубок разнообразно. Оно зависит от их назначения. Широко известно применение электронно-лучевой трубки в телевизионной технике. Эти трубки применяются также в измерительных приборах — электронных осциллографах.

Электронно-лучевая трубка представляет собой стеклянную колбу, из которой выкачан воздух. Внутри колбы вмонтированы катод, устройство для концентрирования электронов в тонкий луч, устройство для отклонения электронного луча и экран. Экран находится в расширенной части колбы. В трубках, предназначенных для преобразования электрической энергии в свет, дно колбы по-

крывается особым составом. Этот состав светится в точках, на которые попадает электрический луч.

На рис. 137 показано устройство электронно-лучевой трубки. Электроны излучаются от катода косвенного накала K . Формирование их в пучок осуществляется с помощью электродов M , A_1 и A_2 .

Первый анод A_1 называется фокусирующим. На него подается положительное напряжение в несколько сотен вольт.

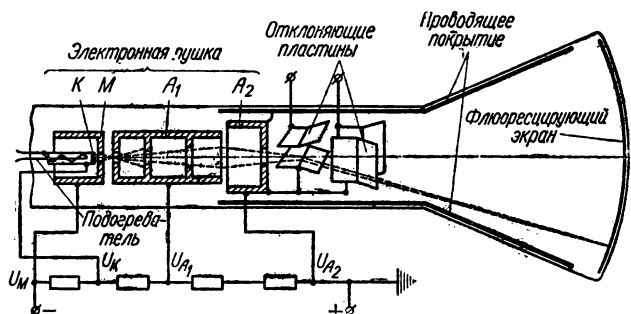


Рис. 137. Электронно-лучевая трубка.

Второй анод A_2 имеет форму короткого цилиндра, который закрыт на конце диафрагмой. В центре диафрагмы имеется отверстие. На цилиндр A_2 подают положительное напряжение в несколько киловольт.

Управление лучом осуществляется отклоняющими пластинами. Одна пара пластин служит для отклонения луча в горизонтальном направлении, а другая — в вертикальном.

Если на пластины подается переменное напряжение, то образуется электрическое поле и электронный луч отклоняется от первоначального направления.

На одну пару пластин подается периодическое пилообразное напряжение, которое заставляет луч чертить на экране горизонтальную линию.

В осциллографах исследуемое напряжение подается на вторую пару пластин. Взаимодействующие электрические поля пластин перемещают луч так, что он чертит на экране кривую, определяющую характер изменения исследуемого напряжения.

В некоторых типах трубок для управления лучом применяются электромагнитные отклоняющие системы.

§ 128. ЛАМПОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

Генераторы незатухающих колебаний — одно из наиболее распространенных применений электронных ламп. Генераторы такого рода обычно состоят из электронной лампы, колебательного контура, катушки обратной связи и источников питания. Колебательный контур — это параллельное включение емкости C_k и катушки самоиндукции L_k (рис. 138).

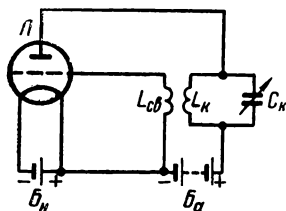


Рис. 138. Схема лампового генератора.

Ламповые генераторы работают следующим образом. Представим себе, что батарея накала B_n включена. Тогда при замыкании цепи анода появится ток, который начнет заряжать конденсатор C_k . При этом нижняя обкладка конденсатора будет заряжаться положительно, а верхняя — отрицательно. Благодаря катушке самоиндукции в колебательном контуре ток не сразу достигнет своей нормальной величины, а только через некоторый промежуток времени. Когда заряд конденсатора закончится, напряжение на его обкладках достигнет определенной величины.

После этого конденсатор начнет разряжаться через катушку самоиндукции. Теперь ток в колебательном контуре пойдет от положительной обкладки конденсатора к отрицательной. Он будет возрастать от нулевого значения до максимального. В тот момент, когда напряжение станет равным нулю, ток в катушке будет наибольший. При этом вся электростатическая энергия, находившаяся в конденсаторе, перейдет в электромагнитную энергию катушки. Затем начнется перезаряд конденсатора за счет энергии катушки. Когда ток в контуре уменьшится до нуля, конденсатор опять зарядится до наибольшего напряжения. Зарядившись, конденсатор снова разрядится, но теперь уже в обратном направлении.

Таким образом, в контуре возникнут свободные колебания. Однако эти колебания могут быстро прекратиться, если их не поддерживать. Для поддержания колебаний

необходимо пополнять потери энергии в контуре. Если пополнение энергии будет происходить в течение каждого периода, колебания не будут затухать.

Пополнение энергии в колебательном контуре берет на себя электронная лампа. Когда в катушке самоиндукции L_k проходит ток, он создает переменное магнитное поле. В катушке $L_{св}$ появится при этом электродвижущая сила такой же частоты, как и частота колебаний в контуре. Благодаря этому между сеткой и катодом появится переменное напряжение.

Таким образом, катушка L осуществляет связь между колебательным контуром и управляющей сеткой. Поэтому она называется катушкой обратной связи.

Появившееся на сетке напряжение вызовет изменение анодного тока. Анодный ток будет изменяться с частотой, которая также совпадает с частотой колебаний контура. Если ток импульсов анодного тока будет совпадать по направлению с разрядным током конденсатора, потери энергии в цепи будут компенсироваться.

Энергия, доставляемая лампе анодной батареей, как бы подталкивает возникшие в контуре колебания в каждом периоде и таким образом пополняет потери энергии.

Итак, чтобы колебания были незатухающими, подводимое к сетке напряжение должно вызывать изменения анодного тока в такт колебаниям контура. Это будет только при правильном включении катушки обратной связи. Если концы этой катушки включены неправильно, колебания не возникнут.

Частота колебаний зависит от величины самоиндукции катушки L_k и емкости конденсатора C_k . Период собственных колебаний контура можно определить по формуле

$$T = 2\pi \sqrt{L_k C_k}.$$

Подбирая различные значения самоиндукции и емкости, можно настроить генератор на любую частоту колебаний.

§ 129. ЛАМПОВЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

В соответствии с задачами усиления, которые необходимо разрешить, различают усилители мощности и усилители напряжения.

В зависимости от области усиливаемых частот бывают усилители низкой, высокой и промежуточной частоты. Усилители также различаются по типу анодной нагрузки. В зависимости от характера анодной нагрузки усилители могут быть реостатные, трансформаторные, резонансные и другие.

Усилители можно рассматривать как генераторы с посторонним возбуждением. Самовозбуждение усилителей вредно, так как оно вызывает наложение усиливаемых колебаний на собственные колебания.

На рис. 139 изображена схема усилителя мощности. Когда напряжение возбуждения U_c отсутствует, в анод-

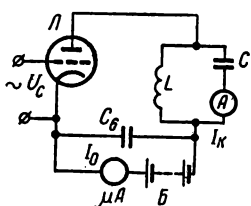


Рис. 139. Схема усилителя мощности.

ной цепи проходит постоянный ток, соответствующий нулевому напряжению на сетке. Напряжение источника тока при этом полностью приложено к аноду и катоду лампы. Сопротивление катушки самоиндукции постоянному току незначительно, и падение напряжения на ней можно не принимать во внимание.

Подведем теперь к сетке лампы переменное напряжение от задающего генератора. При этом в анодной цепи появится пульсирующий ток. Частота его пульсаций будет соответствовать частоте подводимых к сетке колебаний. Пульсирующий ток можно рассматривать как результат сложения постоянного тока, действовавшего в цепи до включения напряжения на сетку, и переменного, который появился после этого включения. Совершенно очевидно, что частота переменной составляющей анодного тока равна частоте переменного напряжения на сетке. Переменная составляющая будет проходить в замкнутом контуре, состоящем из лампы, параллельных ветвей колебательного контура и конденсатора $C_б$. Этот конденсатор называется блокировочным, так как он шунтирует батарею B_a . Такое включение конденсатора необходимо для того, чтобы переменная составляющая анодного тока не создавала падения напряжения на батарее.

Переменная составляющая анодного тока проходит участок цепи, состоящий из параллельно включенных ка-

тушки и конденсатора. Этот участок представляет собой определенное сопротивление переменному току.

В точках включения этого сопротивления в общую цепь возникает переменное напряжение U . С появлением напряжения на зажимах контура в нем возникают вынужденные колебания. Напряжение U желательно получить возможно большим. Поэтому сопротивление его надо тоже увеличить до возможной величины. Очевидно, что это наступит тогда, когда контур настроен в резонанс вынужденным колебаниям. Подобрав соответствующие величины емкости и индуктивности, можно добиться резонанса тока в цепи. При этом в контуре будет наибольший ток. Ток в контуре в несколько раз превышает величину переменной составляющей анодного тока. Эти токи сдвинуты по фазе на 90° . Усиление мощности колебаний получается благодаря тому, что в анодном контуре усилителя колебания будут намного большей мощности, чем в цепи сетки.

ГЛАВА 4

ИОННЫЕ ПРИБОРЫ

§ 130. ПОНЯТИЕ ОБ ИОННЫХ ПРИБОРАХ

Как и в электронных лампах, в ионных приборах источником первичных электронов является катод. Но в электронных лампах в баллонах — вакуум, в ионных приборах баллон после откачки воздуха наполняется неоном, аргоном или парами ртути.

Ионные приборы работают следующим образом. Электроны, вылетая из катода, под действием электрического поля с возрастающей скоростью устремляются к аноду. Если скорость их движения становится достаточно большой, они, сталкиваясь с молекулами газа, выбивают из них вторичные электроны, а молекулы, потеряв один или несколько электронов, оказываются заряженными положительно. Положительно заряженные молекулы становятся ионами. Масса иона больше массы электрона, поэтому скорость движения ионов меньше скорости электронов. Ионы, находясь в электрическом поле между катодом и анодом и имея положительный заряд, направляются к катоду.

Освободившиеся из молекул электроны тоже вступают в процесс образования ионов. Ионизация газа в баллоне быстро усиливается и развивается лавинообразно. Напряжение, при котором может начаться ионизация, называют напряжением зажигания.

В ионных приборах применяются как нагреваемые, так и холодные катоды. Излучение электронов из холодных катодов возможно в том случае, если между катодом и анодом имеется определенная, достаточно большая разность потенциалов.

Наряду с ионизацией в приборах этого типа осуществляется восстановление ионов в нейтральные молекулы, сопровождаемое свечением газа.

Причиной свечения является выделение энергии, затраченной ранее на расщепление молекул. Цвет свечения зависит от того, каким газом наполнен баллон. Аргон дает сиреневое свечение, неон — красное, ртутные пары — синеватое.

§ 131. ГАЗОТРОНЫ

Газотроном называется газоразрядная двухэлектродная лампа с твердым накаливаемым катодом. Применяются газотроны для выпрямления переменного тока в постоянный. Газотрон — это стеклянный баллон, в котором находится изготовленный в виде двойной спирали никелевый катод и железный или графитовый анод. В нижней части баллона находится капля ртути.

Баллон заполнен парами ртути. Преимущество газотрона перед ртутной выпрямительной колбой заключается в том, что в газотроне накаливается твердый катод, в ртутной колбе катодом является жидкая ртуть и она зажигается искусственно образованной дугой.

Газотроны очень чувствительны к колебаниям тока накала, величина которого зависит от напряжения. Поэтому в схемах газотронных выпрямителей обычно предусматривается стабилизация напряжения накала. Газотрон нельзя перегревать, так как перегрев вызывает появление обратного зажигания. Включать нагрузку на газотронный выпрямитель надо только через несколько минут после включения накала катода.

§ 132. ТИРАТРОНЫ

Тиратроном называется трехэлектродная лампа, наполненная аргоном или парами ртути при низком давлении. Источником электронов является накаливаемый катод. Анод и катод находятся внутри металлического цилиндра. В цилиндре имеется перфорированный диск, который по аналогии с вакуумными приборами называют сеткой.

Сетка управляет в тиратроне разрядом. Если на сетку подается отрицательный потенциал, ток через тиратрон не проходит.

В отличие от некоторых электронных ламп в тиратроне можно управлять моментом зажигания разряда. Это позволяет использовать тиратрон в качестве реле в различных схемах.

§ 133. РТУТНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Ртутные выпрямители получили большое распространение и широко применяются там, где необходимо получить для питания электрических цепей постоянный ток.

Принцип действия ртутного выпрямителя заключается в том, что дуга, горящая в разреженном пространстве, наполненном парами ртути, пропускает ток только в одном направлении.

Колба ртутного выпрямителя в зависимости от ее назначения может иметь по бокам несколько отростков, в которых помещены электроды из графита. Эти электроды являются анодами. Катодом служит ртуть, налитая в нижнюю часть колбы. Вблизи ее расположен вспомогательный анод. Он тоже наполнен ртутью и служит для зажигания выпрямителя.

Ртутный катод должен быть разогрет до появления светлого пятна. Из разогретого катода электроны устремляются к аноду, положительные ионы, образовавшиеся в результате ионизации паров ртути, притягиваются катодом. Ударяясь о поверхность катода, они теряют свою энергию, которая переходит в тепло. Благодаря этому поддерживается достаточно высокая температура пятна на поверхности катода.

Затухание дуги предупреждается включенной в цепь выпрямленного тока дроссельной катушкой с большой

индуктивностью. Она не дает выпрямленному току снижаться до нуля, так как если ток исчезнет, то дуга погаснет, и работа колбы прекратится.

Ртутные выпрямители изготавливаются как однофазные, так и многофазные. Полуволны трехфазного переменного тока перекрывают друг друга, и ток не может снизиться до нуля. Поэтому дроссельная катушка в цепи нагрузки не нужна.

При пуске ртутного выпрямителя необходимо вначале образовать дугу искусственно. Для этого колбу слегка покачивают так, чтобы ртуть пускового анода соединилась с ртутью катода. Когда колбу выпрямляют, ртуть разрывает цепь и дуга обрывается.

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**§ 134. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ**

Электрическим измерительным прибором называют устройство, которое предназначено для измерения различных электрических величин.

По своему назначению основные электроизмерительные приборы могут быть классифицированы следующим образом:

- 1) приборы, предназначенные для измерения тока — амперметры и миллиамперметры;
- 2) приборы для измерения напряжения — вольтметры и милливольтметры;
- 3) приборы для измерения электрической мощности — ваттметры;
- 4) приборы для измерения электрической энергии — счетчики электрической энергии;
- 5) приборы для измерения электрического сопротивления — омметры;
- 6) приборы для измерения частоты переменного тока — частотомеры.

По принципу действия электроизмерительные приборы подразделяются на следующие системы:

- а) магнитоэлектрические;
- б) электромагнитные;
- в) электродинамические;
- г) тепловые;
- д) индукционные;
- е) электростатические;
- ж) вибрационные.











Электроизмерительные приборы бывают переносные и щитовые. Щитовые приборы устанавливаются на распределительных щитах.









Электроизмерительные приборы должны давать непосредственный отсчет измеряемых величин в практических единицах, потреблять незначительную мощность и быть достаточно точными. Технические измерительные приборы обеспечивают точность показаний до 1,5—2,5%. Лабораторные измерительные приборы имеют точность показаний 0,2—0,5%.

Систему электроизмерительного прибора можно определить по тем условным обозначениям, которые имеются на его шкале. Условные обозначения электроизмерительных приборов приводятся в табл. 6.

Таблица 6

Условные обозначения электроизмерительных приборов

Магнитоэлектрическая		С механической противодействующей силой	
		Без механической противодействующей силы	
Электромагнитная		С механической противодействующей силой	
		Без механической противодействующей силы	
Электродинамическая	Без железа	С механической противодействующей силой	
		Без механической противодействующей силы	
	Ферродинамическая	С механической противодействующей силой	
		Без механической противодействующей силы	
	Индукционная		С механической противодействующей силой
Без механической противодействующей силы			
Тепловая			

Термоэлектрическая	С контактным термопреобразователем	
	С изолированным термопреобразователем	
Детекторная		
Электронная		
Электростатическая		
Электролитическая		
Вибрационная		
Фотоэлектрическая		

§ 135. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Магнитоэлектрические приборы пригодны только для измерения силы тока и напряжения в цепях постоянного тока. Устройство такого прибора показано на рис. 140. Прибор состоит из постоянного магнита подковообразной формы. В магнитном поле его полюсов находится подвижная рамка с несколькими витками изолированной проволоки. К оси рамки прикреплена стрелка. При прохождении тока в витках проволоки, находящейся на рамке, последняя поворачивается на определенный угол, зависящий от силы тока. Повороту рамки противодействуют две спиральные пружины. После поворота рамки стрелка останавливается на определенном делении градуированной шкалы. Ток к обмотке рамки подводится по спиральным пружи-

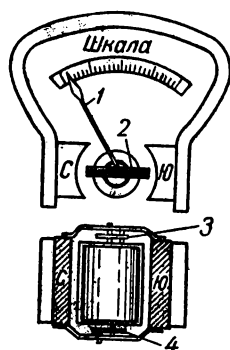


Рис. 140. Схема устройства магнитоэлектрического прибора:

1 — стрелка; 2 — рамка; 3, 4 — пружины.

нам. Эти пружины возвращают рамку со стрелкой в первоначальное положение, когда ток прекращается. Ввиду того, что рамка поворачивается в ту или иную сторону в зависимости от направления тока, надо следить за правильным включением прибора.

Магнитоэлектрические приборы отличаются высокой чувствительностью и точностью показаний. Шкала этих приборов равномерная. Они боятся перегрузки, так как сечение спиральных пружин, подводящих ток к рамке, и проволоки, укрепленной на рамке, незначительно.

§ 136. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРИБОРЫ

Электромагнитные приборы пригодны для измерения как постоянного, так и переменного тока. Они применяются для измерения силы тока и напряжения. Действие прибора основано на том, что при прохождении тока в обмотке катушки внутрь ее втягивается железный сердеч-

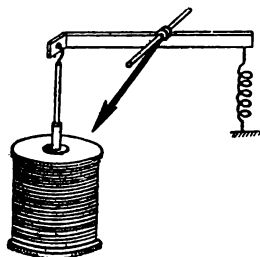


Рис. 141. Принцип действия электромагнитного прибора.

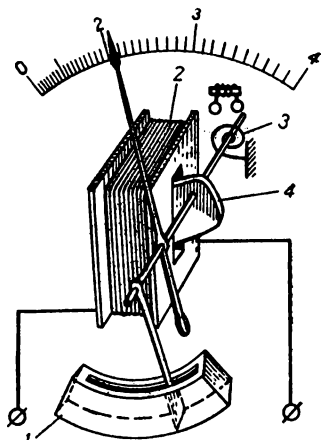


Рис. 142. Устройство электромагнитного прибора:
1 — воздушный успокоитель; 2 — катушка; 3 — спиральная пружина; 4 — сердечник.

ник. Принцип действия такого прибора ясен из рис. 141. Чем больший ток проходит в катушке прибора, тем сильнее втягивается сердечник, а стрелка поворачивается на больший угол. После прекращения тока стрелка возвращается в исходное положение под действием пружины. Детали устройства электромагнитного прибора показаны на рис. 142. Отклонение стрелки не пропорционально возрастанию тока в катушке, поэтому шкала прибора

неравномерна. Это отклонение зависит от напряжения магнитного поля в катушке и от магнитной индукции в сердечнике. Прибор имеет воздушный успокоитель подвижной системы, который состоит из камеры и поршня. Это устройство успокаивает колебание стрелки, когда она достигает положения равновесия. Стрелка возвращается в исходное положение спиральной пружиной.

К достоинствам электромагнитных приборов относится простота конструкции и нечувствительность к кратковременным перегрузкам. Точность измерения этих приборов меньше, чем магнитоэлектрических. Показания их зависят от внешних магнитных полей. Уменьшение влияния внешних полей достигается тем, что корпус электромагнитного прибора изготавливается из железа.

§ 137. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Электродинамические приборы пригодны для измерения постоянного и переменного тока. Устройство их основано на взаимодействии магнитных полей, которые создаются двумя обмотками. Прибор состоит из неподвижной катушки, изготовленной в виде двух находящихся рядом секций, и подвижной катушки, помещенной внутри них. Подвижная катушка вращается вместе с осью, на которой укреплена стрелка прибора. Устройство прибора показано на рис. 143. Когда в обмотках катушек протекает ток, подвижная катушка стремится занять такое положение, при котором ее магнитное поле совпадало бы с полем неподвижной катушки. Вращающее усилие, поворачивающее подвижную катушку, пропорционально произведению токов обеих катушек. Приборы этой системы имеют неравномерную шкалу. Неподвижная катушка наматывается из толстого провода

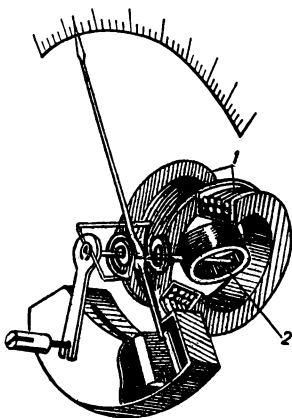


Рис. 143. Устройство электродинамического прибора:
1 — неподвижная катушка; 2 — подвижная катушка.

и имеет небольшое сопротивление. Подвижная катушка изготавливается из большого числа тонкой проволоки. Если прибор действует как амперметр, то обмотки катушек соединяются параллельно. В вольтметрах этой системы катушки включены последовательно. Электродинамические приборы нашли широкое применение для измерения мощности в цепях постоянного и переменного тока. Электродинамические ваттметры имеют четыре зажима. К двум из них, отмеченным буквой *A*, подключается толстая обмотка. К зажимам, имеющим обозначение *E* или *V*, подводится тонкая обмотка.

Приборы этой системы могут обеспечить высокую точность показаний. Однако их показания зависят от внешних магнитных полей. Эти приборы боятся перегрузки.

§ 138. ТЕПЛОВЫЕ ПРИБОРЫ

Тепловые приборы могут быть использованы для измерения постоянного и переменного токов. Их устройство основано на удлинении проводника при нагревании его

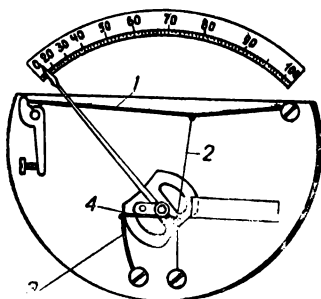


Рис. 144. Схема устройства теплового прибора:

1 — нагреваемая нить; 2 — мостик; 3 — пружина; 4 — шелковая нить.

проходящим по нему током. Степень удлинения проводника позволяет судить о силе тока. Схема устройства теплового прибора показана на рисунке 144. Когда ток проходит через тонкую металлическую нить и нагревает ее, нить удлиняется и провисает. В середине нити укреплен вспомогательная металлическая нить, которую называют *мостиком*. К этой нити прикреплена шелковая нить. Она перекинута через ролики и натягивается пружиной. Пружина удерживает в натянутом состоянии все три нити. Если

при нагревании нить удлиняется, ролик поворачивается вместе с укрепленной на нем стрелкой. Когда прибор выключен, нить охлаждается, и стрелка устанавливается в исходное положение.

Удлинение нити пропорционально квадрату силы тока, поэтому шкала прибора неравномерная.

Внешние магнитные поля влияют на тепловые приборы. Стрелка теплового прибора устанавливается плавно и без колебаний. Приборы эти нельзя перегружать.

§ 139. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Для измерения больших переменных токов и больших переменных напряжений пользуются вспомогательными приборами — измерительными трансформаторами. Большие токи и напряжения подводятся к первичным обмоткам этих трансформаторов. Ко вторичным обмоткам подключаются измерительные приборы. Измерительные трансформаторы позволяют расширить пределы измерения применяемых приборов и обеспечить должным образом их электрическую изоляцию от высокого напряжения.

Трансформаторы токов делятся на пять классов точности в соответствии с величиной допустимой погрешности. Номинальная сила тока во вторичной обмотке большей частью равна 5 а. В связи с этим измерительные приборы, включаемые через трансформатор тока, рассчитываются на силу тока 5 а. На шкалах приборов, предназначенных для включения с измерительным трансформатором, имеются надписи в виде дроби, числитель которой соответствует номинальному току первичной обмотки, а знаменатель — току вторичной обмотки.

Трансформаторы напряжения делятся на три класса точности. Согласно принятому общесоюзному стандарту напряжение во вторичной обмотке должно быть 100 в.

Измерительные приборы, подключаемые к трансформаторам напряжения, рассчитываются обычно на 130—140 в. На шкалах таких приборов также имеется обозначение в виде дроби. В числителе дроби указано первичное, а в знаменателе — вторичное напряжение измерительного трансформатора. Это обозначение имеет примерно следующий вид:

$$C_{тр} \cdot \frac{6000}{100} \text{ в.}$$

§ 140. ЛАМПОВЫЕ ВОЛЬТМЕТРЫ

Приборы на электронных лампах широко применяются для измерений.

Применение усилительных ламп позволяет обеспечить многократное усиление измерительных величин, что дает возможность создать измерительные приборы высокой чувствительности. Ламповые приборы потребляют очень незначительную энергию.

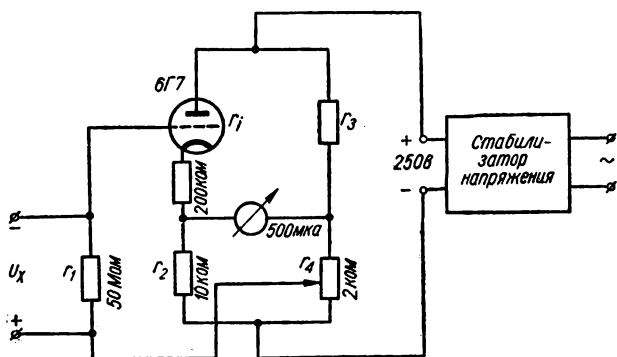


Рис. 145. Схема лампового вольтметра постоянного тока.

Двухэлектродная лампа, включаемая как выпрямитель, является простым ламповым вольтметром.

Схема лампового вольтметра для измерения напряжения постоянного тока изображена на рис. 145. Она пред-

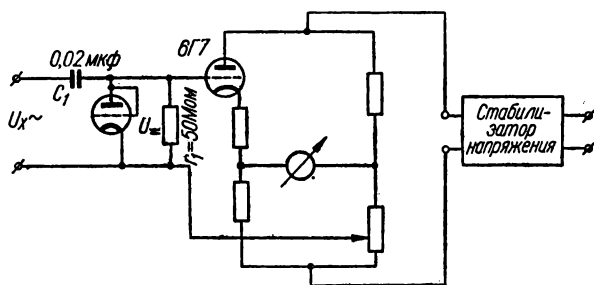


Рис. 146. Схема лампового вольтметра переменного тока.

ставляет собой мост, в одно из плеч которого включена усилительная лампа 6Г7. Этот прибор потребляет в десять тысяч раз меньше тока, чем включенный в мост магнитоэлектрический механизм.

Для измерения переменного напряжения достаточно подключить к этой схеме выпрямительную цепь, как это показано на рис. 146.

По такой схеме собраны амплитудные вольтметры переменного тока типа ЛВ-2 и ВКС-7.

Показания ламповых приборов в значительной степени зависят от напряжения источников питания. Это ведет к низкой точности измерения. Погрешность таких приборов достигает $\pm 3\%$. Погрешность ламповых вольтметров зависит от точности стабилизации напряжения питающей сети. Относительная погрешность показаний прибора в несколько раз больше относительного изменения напряжения питающей сети.

Несмотря на эти недостатки, ламповые вольтметры широко распространены. Этому способствует ничтожное потребление мощности и широкий частотный диапазон приборов.

§ 141. ПРИБОРЫ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ И ЗАПИСИ ПЕРЕМЕННЫХ ВЕЛИЧИН

В практике необходимо знать значение измеряемой величины не только в данный момент, но и наблюдать ее изменение на протяжении более или менее длительного времени. В таких случаях удобно иметь автоматическую запись значений измеряемых величин или картину их изменений в виде кривых и графиков.

Если частота изменений измеряемой величины меньше одного герца и процесс изменений осуществляется сравнительно медленно, то можно пользоваться самопишущими приборами.

Для записи быстро протекающих процессов лучше применять осциллографы.

Запись исследуемых величин является документом, по которому можно установить правильность технологического процесса или судить об исправности машин. Так, например, на основании записей последовательных значений мощности, которую отдает турбогенератор, можно узнать растет или падает нагрузка. В зависимости от этого возникает необходимость включения или выключения резервных машин.

Особенно большое значение имеет запись значений наблюдаемых величин в научно-исследовательской работе.

На основании таких записей определяются закономерности динамических процессов при исследовании новых машин, аппаратов, электрических цепей и в других случаях.

§ 142. САМОПИШУЩИЕ ПРИБОРЫ

В самопишущих приборах запись значений измеряемых величин осуществляется автоматически чернилами или световым лучом. В первом случае показания нано-

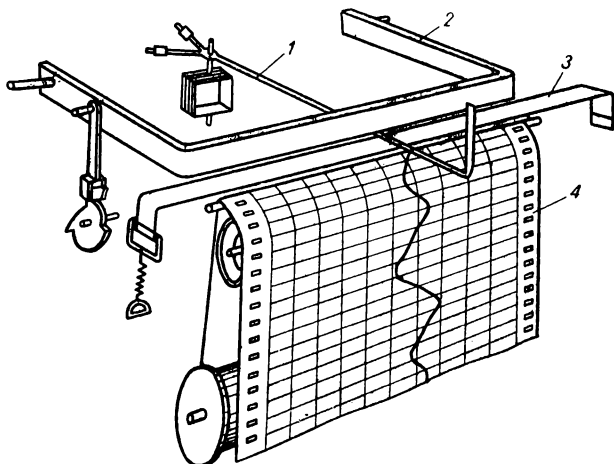


Рис. 147. Схема прибора с точечной записью.

сятся на движущуюся бумагу пером, закрепленным на конце стрелки прибора. Световой луч используется при фотозаписи.

При записи чернилами применяется бумага в виде ленты или диска. Ленту подвигает механизм, перематывая ее с одной катушки на другую. Записывающее перо перемещается перпендикулярно к ленте.

Для продвижения ленты служит часовой механизм или электромагнитное импульсное устройство, которое получает импульсы от центральных часов.

Для уменьшения трения между бумагой и пером в некоторых типах самопишущих приборов применяется точечная запись. На рис. 147 показана схема прибора с точечной записью. В этом приборе стрелка 1 перемещается над бумагой, не касаясь ее. Дужка 2 через определен-

ные интервалы времени падает на стрелку и прижимает ее к бумаге. Между стрелкой и бумагой находится красящая лента. Когда дужка касается стрелки, на бумагу наносится точка. Автоматический переключатель может переставлять ленты разных цветов и переключать измерительное устройство из одной цепи в другую.

Благодаря этому на ленте записывается несколько кривых разных цветов, соответствующих той или иной исследуемой величине.

§ 143. ОСЦИЛЛОГРАФЫ

Для наблюдения за изменяющимися во времени процессами удобно пользоваться осциллографами.

Для осциллографирования явлений, частота которых не превышает нескольких тысяч герц, можно пользоваться электромеханическими осциллографами. Для наблюдения явлений, изменяющихся с более высокими частотами, необходимо применять электронные осциллографы.

В электромеханических осциллографах запись кривых, характеризующих исследуемые явления, осуществляется при помощи луча света, который отражается от зеркала, укрепленного на вибраторе.

В электронных осциллографах для записи исследуемых процессов используются электронно-лучевые трубки. Электронные осциллографы позволяют наблюдать как периодически повторяющиеся, так и однократные процессы. Этими приборами можно измерить сдвиг фаз между напряжениями, длительность процессов, их амплитуду и осуществлять многие другие измерения.

Схемы электронных осциллографов довольно сложны. Обычно в такую схему входят синхронизирующие устройства, усилители напряжений, влияющих на электронный луч трубки, устройства для развертки, калибраторы амплитуды и времени.

ГЛАВА 2

ЭЛЕКТРОИЗМЕРЕНИЯ

§ 144. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА И НАПЯЖЕНИЯ

Для измерения величины тока применяют амперметры, миллиамперметры или микроамперметры в зависимости от того, каков порядок измеряемой величины.

Измерение напряжения производится при помощи вольтметров или милливольтметров.

Чтобы измерить ток в цепи, надо пропустить через измерительный прибор весь ток, поэтому амперметр включается в цепь последовательно. Сопротивление амперметра должно быть очень незначительным. Если бы амперметр имел большое сопротивление, включение его повлекло бы за собой уменьшение тока в цепи.

Вольтметры включаются параллельно той части цепи, где необходимо определить напряжение. Для того чтобы вольтметр не повлиял на распределение токов и падение напряжений в отдельных участках измеряемой цепи, его сопротивление должно быть значительно больше, чем сопротивление измеряемой цепи.

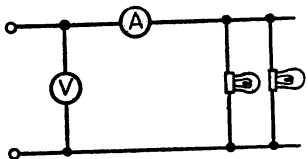


Рис. 148. Включение амперметра и вольтметра.

Правильное включение амперметра и вольтметра показано на рис. 148.

Для измерения токов большей величины, чем та, на которую рассчитан амперметр, применяют шунты. *Шунт* — это сопротивление, которое включается параллельно амперметру. Для того чтобы через амперметр прошла меньшая часть измеряемого тока, сопротивление шунта должно быть меньше сопротивления амперметра. Сопротивление шунта должно быть вполне определенным. Расчет этого сопротивления производится в зависимости от того, какую часть тока мы хотим пропустить через прибор. Если надо, чтобы через амперметр прошел ток в n раз меньше измеряемого тока, то сопротивление шунта можно определить по формуле

$$R_{\text{ш}} = \frac{1}{n-1} \cdot R_A,$$

где $R_{\text{ш}}$ — сопротивление шунта, R_A — сопротивление амперметра. Вполне понятно, что величина измеряемого тока

$$I = I_A n.$$

Правильное включение шунта показано на рис. 149, а конструкция шунта — на рис. 150.

Если необходимо расширить пределы измерения вольтметра, то к нему последовательно подключается

добавочное сопротивление. *Добавочное сопротивление* необходимо для того, чтобы через прибор проходил ток, не превышающий допустимой величины. Величина добавочного сопротивления может быть найдена по следующей формуле:

$$R_d = R_v (n - 1).$$

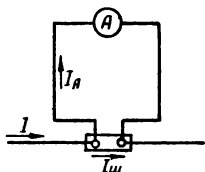


Рис. 149. Включение шунта к амперметру.

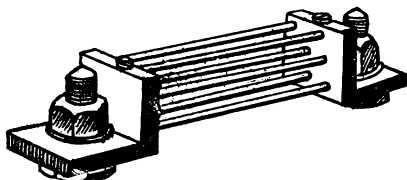


Рис. 150. Внешний вид шунта.

В этой формуле: n — число, показывающее, во сколько раз измеряемое напряжение больше того напряжения, на которое рассчитан прибор; R_v — сопротивление вольтметра и R_d — величина добавочного сопротивления. Вполне понятно, что $n = \frac{U}{U_v}$, где U — измеряемое напряжение и U_v — напряжение, на которое рассчитан вольтметр.

§ 145. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Сопротивление того или иного участка цепи можно определить при помощи амперметра и вольтметра. Для

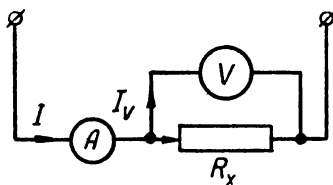


Рис. 151. Схема измерения малых сопротивлений амперметром и вольтметром.

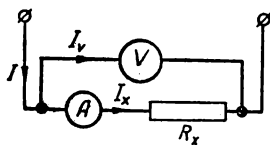


Рис. 152. Схема измерения больших сопротивлений вольтметром и амперметром.

этого амперметр включают последовательно с измеряемым сопротивлением, а вольтметр — параллельно к нему.

Если сопротивление, которое надо измерить, меньше сопротивления вольтметра, то приборы включают так,

как показано на рис. 151. Если же измеряемое сопротивление больше сопротивления амперметра, то приборы включают так, как показано на рис. 152. По первой схеме измеряют малые сопротивления, а по второй — большие.

Величина измеряемого сопротивления может быть определена по закону Ома:

$$R = \frac{U}{I} \text{ ом.}$$

Величина сопротивления может быть определена не только путем вычисления, приводимого выше, но и непосредственным измерением при помощи омметра.

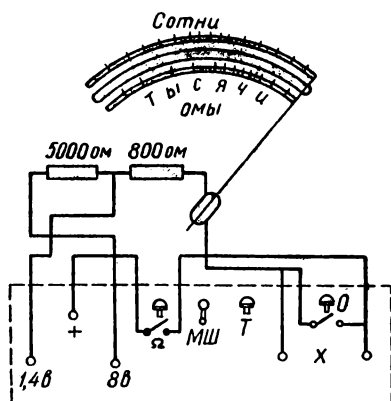


Рис. 153. Принципиальная схема омметра.

Омметр представляет собой прибор магнитоэлектрической системы, последовательно с которым включен источник постоянного тока. Обычно включают сухой гальванический элемент. Известно, что сила тока в цепи зависит от величины сопротивления. Если прибор включен последовательно с измеряемым сопротивлением, то при большом сопротивле-

нии через него пройдет малый ток и стрелка отклонится незначительно. Если сопротивление невелико, то ток в цепи будет большим и стрелка отклонится больше. Шкала омметра градуируется непосредственно в омах, поэтому нуль ее находится справа, что соответствует наименьшему сопротивлению и наибольшему току. Цифры на шкале, показывающие омы, возрастают справа налево. Принципиальная схема омметра завода «Электроприбор» показана на рис. 153. Приступая к измерениям при помощи омметра, надо устанавливать стрелку прибора на нуль, пользуясь магнитным шунтом. Магнитный шунт — это железная пластинка, расположенная

возле полюсов магнита. Изменение ее положения влияет на величину магнитного потока, который проходит через катушку прибора.

При измерении сопротивлений часто применяют набор образцовых сопротивлений, соединенных друг с другом и помещающихся в одном общем ящике. Такой набор сопротивлений называется *магазином сопротивлений*. Схема включения магазина сопротивлений показана на рис. 154. Необходимое количество сопротивлений включается при помощи штепселей. Сопротивление включает-

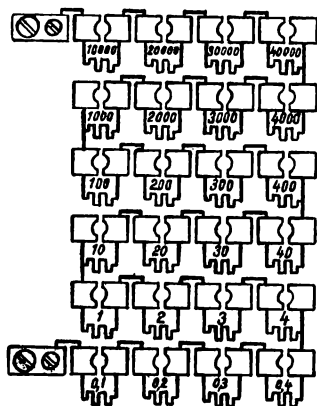


Рис. 154. Схема включения магазина сопротивлений.

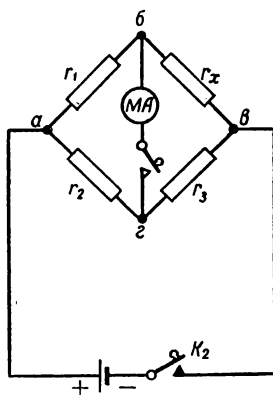


Рис. 155. Схема моста для измерения сопротивлений.

ся в цепь тогда, когда вынут из соответствующего гнезда штепсель.

Измерение сопротивлений часто производится при помощи мостов, составляемых из магазинов сопротивлений.

Три магазина сопротивлений совместно с измеряемым сопротивлением включают так, чтобы образовался замкнутый контур. В одну из его диагоналей включают измерительный прибор (миллиамперметр или гальванометр), а в другую — источник тока.

Сопротивления магазинов можно подобрать так, чтобы через измерительный прибор не проходил ток. Это получится в том случае, когда падения напряжений на участках схемы ab и ag равны друг другу, а напряжение

между точками *бв* равнялось бы напряжению между точками *зв* (рис. 155).

При этом произведение величин противоположных сопротивлений будут равны:

$$r_1 r_3 = r_2 r_x.$$

Отсюда нетрудно найти величину измеряемого сопротивления:

$$r_x = \frac{r_1}{r_2} r_3.$$

§ 146. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ

Мощность в цепи постоянного тока можно определить, применяя амперметр и вольтметр. Мощность равна произведению показаний амперметра и вольтметра. Однако

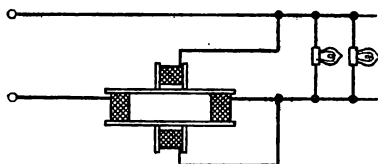


Рис. 156. Схема включения катушек ваттметра.

для измерения мощности удобнее применять прибор, который сразу показывает ее величину. Такой прибор называется *ваттметром*.

Ваттметры электродинамической системы одинаково пригодны для измерения мощности как в

цепи постоянного тока, так и переменного. Такие приборы состоят из двух катушек с обмотками. Одна из катушек неподвижна. Она включается в цепь последовательно и имеет обмотку из толстой проволоки. Другая катушка находится внутри первой и может вращаться. Эта катушка включается параллельно. Схема включения катушек прибора показана на рис. 156. Внутренняя катушка поворачивается благодаря взаимодействию магнитных полей, которые создаются токами, проходящими в обмотках. Магнитное поле неподвижной катушки пропорционально току, поле вращающейся катушки пропорционально напряжению в цепи.

Если такой ваттметр включен в цепь переменного тока, то он показывает активную мощность цепи.

§ 147. ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ

Измерение емкости конденсаторов можно производить, применяя схему моста, показанную на рис. 157.

Конденсатор на схеме отмечен буквой C_x . Конденсатор C_x называется *эталон*ом и имеет определенную емкость. Два других плеча моста представляют собой тонкую проволоку, сопротивление которой включено в общий контур моста. Рядом с проволокой находится градуированная шкала. В одну из диагоналей включен источник переменного тока — зуммер, а в другую — телефон.

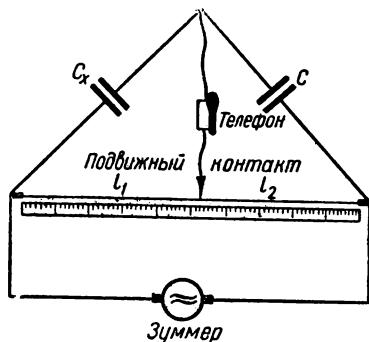


Рис. 157. Схема моста для измерения емкости конденсатора.

Перемещая подвижный контакт вдоль проволоки, добиваются того, чтобы звук в телефоне был наименьшим. При этом положении контакта измеряемая емкость

$$C_x = \frac{l_2}{l_1} C.$$

§ 148. ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ

Измерения индуктивности индуктивных катушек, не имеющих стальных сердечников, можно производить с помощью моста, изображенного на рис. 158.

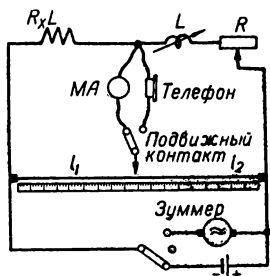


Рис. 158. Схема моста для измерения индуктивности катушек, не имеющих стальных сердечников.

Сначала, передвигая контакт, устанавливают равновесие моста на постоянном токе по наименьшему показанию миллиамперметра. Миллиамперметр включается в диагональ моста. Затем мост переключают на переменный ток, вместо миллиамперметра включают телефон, изменяя величину эталонной индуктивности, добиваются наименьшей громкости звука в телефоне.

Измеряемая индуктивность определится по формуле

$$L_x = \frac{l_1}{l_2} L.$$

§ 149. ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Для измерения электрической энергии применяются приборы, которые называются *счетчиками*. Измерение энергии цепи переменного тока осуществляется при помощи *индукционных счетчиков*.

Индукционный счетчик состоит из алюминиевого диска, который может вращаться на оси. Рядом с диском расположены два электромагнита, магнитные потоки которых проходят через диск и индуктируют в нем вихревые токи. Один из электромагнитов включен последовательно в цепь потребителя, а другой — параллельно ей. Диск вращается в результате взаимодействия между вихревыми токами и магнитными потоками. Вращающий момент пропорционален мощности потребителя электрической энергии.

Скорость вращения диска пропорциональна потребляемой мощности цепи. Если диск вращается в течение определенного времени, то израсходованная в сети энергия пропорциональна числу оборотов диска. Вращение диска передается счетному механизму счетчика, который регистрирует потребляемую энергию.

ОГЛАВЛЕНИЕ

стр.

Введение	3
--------------------	---

ЧАСТЬ I

ПОСТОЯННЫЙ ТОК

ГЛАВА 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ

§ 1. Электричество	11
§ 2. Атомы, электроны и протоны	12
§ 3. Проводники и изоляторы	14
§ 4. Электростатическая индукция	15
§ 5. Электрический ток	16

ГЛАВА 2. ДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

§ 6. Постоянный и переменный ток	18
§ 7. Магнитное действие тока	19
§ 8. Химическое действие тока	19
§ 9. Тепловое действие тока	20
§ 10. Действие тока на живые организмы	21
§ 11. Сила тока	21
§ 12. Электродвижущая сила и напряжение	24
§ 13. Сопротивление проводников	26
§ 14. Единицы измерения э. д. с. и напряжения	29
§ 15. Закон Джоуля — Ленца	30
§ 16. Работа и мощность постоянного тока	31

ГЛАВА 3. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА

§ 17. Гальванические элементы	33
§ 18. Сухие элементы	36
§ 19. Водоналивные элементы	36
§ 20. Элементы с воздушно-марганцевой деполяризацией	37
§ 21. Аккумуляторы	38
§ 22. Свинцовые аккумуляторы	38
§ 23. Щелочные аккумуляторы	40

ГЛАВА 4.**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

§ 24. Составные части электрических цепей	41
§ 25. Закон Ома	42
§ 26. Последовательное соединение сопротивлений	45
§ 27. Параллельное соединение сопротивлений	46
§ 28. Смешанное соединение сопротивлений	48
§ 29. Последовательное и параллельное включение источников тока	48
§ 30. Первый закон Кирхгофа	50
§ 31. Второй закон Кирхгофа	50

ЧАСТЬ II**ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ****ГЛАВА 1.****ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ**

§ 32. Электрическое поле и его свойства	53
§ 33. Электрическая емкость	55
§ 34. Конденсаторы	56
§ 35. Конструкции конденсаторов и их соединения	58

ГЛАВА 2.**МАГНЕТИЗМ И ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ**

§ 36. Магниты и магнитные явления	61
§ 37. Магнитное поле	62
§ 38. Магнитная индукция	64
§ 39. Магнитная проницаемость	65
§ 40. Магнитное поле проводника с током	66
§ 41. Электромагниты	69
§ 42. Действие магнитного поля на проводник с током	70
§ 43. Намагничивание ферромагнитных материалов	71
§ 44. Гистерезис	73

ГЛАВА 3.**ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ**

§ 45. Явления индукции	75
§ 46. Величина и направление э. д. с. индукции	76
§ 47. Явление самоиндукции	78
§ 48. Явление взаимной индукции	80
§ 49. Вихревые токи	81
§ 50. Электромагнитное поле	81

ЧАСТЬ III**ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК****ГЛАВА 1.****ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ**

§ 51. Определение	83
§ 52. Способы получения переменного тока	83
§ 53. Изменение переменного тока и э. д. с. по гармоническому закону	86

ГЛАВА 2.

ГРАФИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 54. Основные сведения из тригонометрии	89
§ 55. Графические способы изображения переменного тока	90
§ 56. Векторные диаграммы	93

ГЛАВА 3.

АКТИВНО-РЕАКТИВНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

§ 57. Понятие о поверхностном эффекте	95
§ 58. Активное сопротивление	96
§ 59. Реактивное сопротивление	97
§ 60. Тепловое действие переменного тока	98
§ 61. Действующее значение переменного тока	98
§ 62. Цепь переменного тока, состоящего только из активного сопротивления и источника э. д. с.	100
§ 63. Цепь переменного тока, состоящая только из индуктивного сопротивления и источника э. д. с.	101
§ 64. Цепь переменного тока, состоящая только из конденсаторов	104
§ 65. Цепь переменного тока, состоящая из активного и индуктивного сопротивлений	107
§ 66. Цепь переменного тока, состоящая из активного и емкостного сопротивлений	112
§ 67. Цепь, состоящая из активного, индуктивного и емкостного сопротивлений	114

ГЛАВА 4.

ТРЕХФАЗНЫЙ ТОК

§ 68. Применение многофазных систем	119
§ 69. Способы получения трехфазного тока	120
§ 70. Соединение звездой	121
§ 71. Соединение треугольником	124

ЧАСТЬ IV

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРОМАТЕРИАЛЫ

ГЛАВА 1.

ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

§ 72. Металлические проводники	127
§ 73. Медь	127
§ 74. Сталь	128
§ 75. Алюминий	128
§ 76. Бронза	128
§ 77. Нихром	129
§ 78. Манганин	129
§ 79. Константан	129
§ 80. Электротехнический уголь	130

ГЛАВА 2.**ИЗОЛИРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ**

§ 81.	Твердые изолирующие материалы	130
§ 82.	Дерево	131
§ 83.	Мрамор	132
§ 84.	Слюда	132
§ 85.	Асбест	133
§ 86.	Стекло	134
§ 87.	Керамика	135
§ 88.	Изолирующие вещества из пластмасс	135
§ 89.	Парафин	137
§ 90.	Битумы	137
§ 91.	Волокнистые материалы	138
§ 92.	Лаки	139

ГЛАВА 3.**ПОЛУПРОВОДНИКИ**

§ 93.	Состояние и развитие полупроводниковой техники	140
§ 94.	Свойства полупроводников	141
§ 95.	Электронная и дырочная проводимости полупроводников	144

ГЛАВА 4.**ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ**

§ 96.	Выпрямители	145
§ 97.	Фотосопротивления	147
§ 98.	Полупроводниковые диоды и транзисторы	149
§ 99.	Фотоэлементы	153
§ 100.	Термоэлементы	156
§ 101.	Холодильники	158
§ 102.	Ферриты	159
§ 103.	Термисторы	159

ЧАСТЬ V**МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА****ГЛАВА 1.****МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

§ 104.	Принцип работы генератора постоянного тока	161
§ 105.	Э. д. с. генератора постоянного тока	164
§ 106.	Обмотка якоря	164
§ 107.	Генераторы с последовательным и параллельным возбуждением	167
§ 108.	Регулирование напряжения генераторов	168
§ 109.	Двигатели постоянного тока	169
§ 110.	Двигатели с последовательным и параллельным возбуждением	170
§ 111.	Коэффициент полезного действия	171

ГЛАВА 2.**ТРАНСФОРМАТОРЫ И МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

§ 112. Трансформаторы и их применение	172
§ 113. Работа однофазного трансформатора под нагрузкой	174
§ 114. Трехфазные трансформаторы	175
§ 115. Автотрансформаторы	176
§ 116. Генераторы переменного тока	176
§ 117. Синхронные и асинхронные двигатели	178

ЧАСТЬ VI**ЭЛЕКТРОННЫЕ ЛАМПЫ****ГЛАВА 1.****ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ И УСТРОЙСТВА**

§ 118. Применение электронных ламп	181
§ 119. Принцип работы	182
§ 120. Характеристики и параметры ламп	184
§ 121. Диоды	186

ГЛАВА 2.**ТРЕХЭЛЕКТРОДНЫЕ И МНОГОЭЛЕКТРОДНЫЕ ЛАМПЫ**

§ 122. Триоды	187
§ 123. Тетроды	188
§ 124. Пентоды	190
§ 125. Комбинированные лампы	191
§ 126. Пальчиковые лампы	191
§ 127. Электронно-лучевые трубки	192

ГЛАВА 3.**ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ ЛАМП**

§ 128. Ламповые генераторы	194
§ 129. Ламповый усилитель	195

ГЛАВА 4.**ИОННЫЕ ПРИБОРЫ**

§ 130. Понятие об ионных приборах	197
§ 131. Газотроны	198
§ 132. Тиратроны	199
§ 133. Ртутные выпрямители	199

ЧАСТЬ VII**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ****ГЛАВА 1.****ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**

§ 134. Классификация электроизмерительных приборов	201
§ 135. Магнитоэлектрические приборы	203
§ 136. Электромагнитные приборы	204

§ 137. Электродинамические приборы	205
§ 138. Тепловые приборы	206
§ 139. Измерительные трансформаторы тока и напряжения	207
§ 140. Ламповые вольтметры	207
§ 141. Приборы для наблюдения и записи переменных величин	209
§ 142. Самопишущие приборы	210
§ 143. Осциллографы	211

ГЛАВА 2.

ЭЛЕКТРОИЗМЕРЕНИЯ

§ 144. Измерение тока и напряжения	211
§ 145. Измерение сопротивления	213
§ 146. Измерение мощности	216
§ 147. Измерение емкости	216
§ 148. Измерение индуктивности	217
§ 149. Измерение электрической энергии	218

Николай Дмитриевич Пасечник, канд. техн. наук

Элементарная электротехника

Редактор издательства инж. *Р. С. Деловая*

Художественный редактор *Ю. Б. Бабаков*

Переплет художника *А. Д. Стеценко*

Технический редактор *Т. М. Тачалович*

Корректор *С. В. Кувардина*

Сдано в набор 31/V 1965 г. Подписано к печати 25.VIII 1965 г. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Объем: 7 физ. л., 11,76 усл. л., 10,89 уч.-изд. л. Тираж 63 000. Зак. № 371. БФ 03474. Цена 41 коп. БЗ — 1965 — № 4.

Издательство «Техніка»,
Киев, 4, Пушкинская, 28.

Киевская фабрика набора Государственного комитета
Совета Министров УССР по печати, ул. Довженко, 5.

41 кол.

К

